

POLITECNICO DI MILANO

Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale,
Infrastrutture viarie, e Rilevamento



**TEST DEL SISTEMA DI ACQUISIZIONE GPR 3D SU
GRANDI AREE: GEOSCOPE TM**

Relatore: Prof. Maurizio Lualdi

Correlatore: Ing. Maurizio Porcu

Tesi di laurea di:

Davide Da Col Matr. 739540

Anno accademico 2009/2010

Ringraziamenti

Ringrazio innanzitutto il Professor Maurizio Lualdi per avermi aiutato a capire molti aspetti riguardanti il tema affrontato in questa tesi, per la sua disponibilità, competenza e professionalità nel seguire il lavoro svolto.

Una citazione particolare va anche all'Ing. Maurizio Porcu del Dipartimento di Ingegneria Strutturale che mi è stato di grande aiuto nello svolgere questo lavoro e mi ha fornito alcuni consigli particolarmente utili per poter realizzare le elaborazioni proposte nel Capitolo 5; intendo citare e ringraziare anche l'Ing. Iacopo Sala della 3D Radar per l'aiuto fornitomi nel comprendere alcuni aspetti fondamentali del software utilizzato per eseguire le elaborazioni.

Un ringraziamento davvero particolare va alla mia famiglia e alla mia fidanzata Francesca per tutto l'affetto, l'aiuto e il supporto fornitomi in questi anni e per avermi dato la possibilità di raggiungere questo importante obiettivo.

Un sincero grazie lo devo, inoltre, al mio amico e collega "monitoratore" Stefano, per tutte le ore trascorse insieme al Politecnico e per il sostegno datomi durante questo percorso fatto insieme.

Un ulteriore citazione e ringraziamento va ai miei amici (in particolar modo a Don Riccardo), ai miei compagni dell'università e a tutti coloro che mi sono stati vicini in questi ultimi 5 anni di università.

Un ultimo ringraziamento va al Politecnico di Milano e a i suoi professori i quali mi hanno fornito una più approfondita preparazione, permettendomi di affrontare più consapevolmente le tematiche trattate nelle seguenti pagine.

Sintesi

In questo lavoro di tesi abbiamo analizzato un sistema GPR di ultima generazione (GeoScope TM) che sfrutta la tecnologia "step-frequency" per poter mettere in luce tutti i pregi e i difetti che ne derivano dall'utilizzo di questa strumentazione nelle indagini geofisiche.

Per far ciò si sono utilizzate le acquisizioni effettuate dalla 3D Radar presso il test site di Nantes (realizzato all'interno del "Laboratoire Central des Ponts et Chaussées").

La nostra analisi sulla strumentazione si è basata essenzialmente su 2 test:

il primo (test di penetrazione) ha il compito di evidenziare quale sia la profondità di investigazione del radar nei diversi materiali del sito, mentre il secondo test è adatto a valutare quale sia la risoluzione effettiva con la quale vengono identificati i tubi a piccolo diametro (inferiore ai 10 mm) posti nelle diverse zone del sito di Nantes.

Indice dei contenuti

RINGRAZIAMENTI	I
SINTESI	II
INDICE DEI CONTENUTI	III
INDICE DELLE FIGURE	V
INDICE DELLE TABELLE	VII
CAPITOLO 1 IL SISTEMA GEOSCOPE TM	1
1.1 IL PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO E LE PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEL SISTEMA GEOSCOPE TM DELLA 3D RADAR	1
1.2 IL PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO E LE PRINCIPALI CARATTERISTICHE DEL SISTEMA GEOSCOPE TM DELLA 3D RADAR	3
1.3 LE CARATTERISTICHE DEL SISTEMA "STEP-FREQUENCY"	5
1.3.1 <i>Le differenze tra i dati "step-frequency" rispetto a quelli provenienti da radar ad impulso</i>	6
CAPITOLO 2 IL TEST SITE DI NANTES	10
2.1 DESCRIZIONE DEL SITO	11
2.2 ZONA 1 – STRATO DI LIMO	13
2.3 ZONA 2 – MULTISTRATO	15
2.4 ZONA 3 – STRATO DI SABBIA CALCAREA D'ARTHON	16
2.5 ZONA 4 – STRATO DI GHIAIA 14/20.....	18
2.6 ZONA 5 – STRATO DI GHIAIA 0/20	21
2.7 DISPOSIZIONE PER LA PROTEZIONE CONTRO LE INFILTRAZIONI DI ACQUA NEL SITO.....	23
2.8 RIEMPIMENTO DELLA FOSSA	25
CAPITOLO 3 METODOLOGIA DI ACQUISIZIONE ESEGUITA A NANTES	27
CAPITOLO 4 TEST ESEGUITI SUL SISTEMA GEOSCOPE TM	32
4.1 TEST DI PENETRAZIONE NELLA ZONA 5 – GHIAIA 14/20	33
4.2 TEST DI IDENTIFICAZIONE DEI TUBI A PICCOLO DIAMETRO NELLA ZONA 5	34

4.3 TEST DI PENETRAZIONE NELLA ZONA 4 – GHIAIA 0/20	38
4.4 TEST DI IDENTIFICAZIONE DEI TUBI A PICCOLO DIAMETRO NELLA ZONA 4	39
4.5 TEST DI PENETRAZIONE NELLA ZONA 3 – SABBIA CALCAREA.....	43
4.6 TEST DI IDENTIFICAZIONE DEI TUBI A PICCOLO DIAMETRO NELLA ZONA 3	45
4.7 TEST DI PENETRAZIONE NELLA ZONA 2 - MULTISTRATO	48
4.8 TEST DI PENETRAZIONE NELLA ZONA 1 - LIMO	51
4.9 TEST DI IDENTIFICAZIONE DEI TUBI A PICCOLO DIAMETRO NELLA ZONA 1	52
CAPITOLO 5 CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	54
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI E SITOLOGIA	59

Indice delle figure

Figura 1.1 - Unità di controllo 3D Radar GeoScope TM	3
Figura 1.2 - Schema esemplificativo del sistema GeoScope TM	4
Figura 1.3 - Sezione dell'antenna utilizzata tramite sistema GeoScope TM	5
Figura 1.4 - Forma d'onda con metodologia "step frequency"	6
Figura 1.5 - Copertura in frequenza dell'antenna utilizzata dal sistema GeoScope TM rispetto alle tradizionali antenne GPR	7
Figura 1.6 – Schema interno di un'antenna a 21 canali del sistema GeoScope TM	8
Figura 1.7 - Diversi metodi di acquisizione dei dati	9
Figura 2.1 - Planimetria del test di Nantes	12
Figura 2.2 - Sezione della zona 1 contenente limo	14
Figura 2.3 - Posa degli stendimenti di tubi nella zona 1	14
Figura 2.4 - Sezione della zona 2 (multistrato)	16
Figura 2.5 - Schema granulometrico della sabbia calcarea d'Arthon utilizzata nella zona 3	17
Figura 2.6 - Sezione della zona 3 contenente sabbia calcarea d'Arthon	17
Figura 2.7 - Posa degli stendimenti di tubi nella zona 3	18
Figura 2.8 - Schema granulometrico della ghiaia 14/20 utilizzato nella zona 4	19
Figura 2.9 - Tipologia dei dolmen di gneiss sotterrati nella zona 4	20
Figura 2.10 - Sezione della zona 4 contenente ghiaia 14/20	20
Figura 2.11 - Schema granulometrico della ghiaia 0/20 utilizzato nella zona 5	21
Figura 2.12 - Posa degli stendimenti di tubi nella zona 5	22
Figura 2.13 - Sezione della zona 5 contenente ghiaia 0/20	22
Figura 2.14 - Lavori di posa degli strati geotessili sul fianco della vasca	24
Figura 2.15 - Lavori di riempimento dello scavo tramite l'utilizzo di un automezzo con benna	25
Figura 3.1 - Schema di acquisizione utilizzato nel sito di Nantes	28
Figura 3.2 - Fase di montaggio del sistema GeoScope TM utilizzato a Nantes	29
Figura 3.3 - Sistema GeoScope TM utilizzato a Nantes	29
Figura 3.4 - Schema dell'antenna V1821p	30
Figura 4.1 - Test di penetrazione sulla linea di scansione 26 (zona 5)	34

Figura 4.2 - Sezione della zona 5	35
Figura 4.3 - Test di identificazione dei tubi a piccolo diametro sulla linea di scansione 26 (zona 5)	36
Figura 4.4 - Schermata del programma 3D Radar Examiner per impostare i parametri necessari ad effettuare l'operazione di "migrazione" nella zona 5	37
Figura 4.5 - Operazione di "migrazione" sulla linea di scansione 26 (zona 5)	38
Figura 4.6 - Test di penetrazione sulla linea di scansione 24 (zona 4)	39
Figura 4.7 - Sezione della zona 4	40
Figura 4.8 - Test di identificazione dei tubi a piccolo diametro sulla linea di scansione 24 (zona 4)	41
Figura 4.9 - Test di identificazione dei tubi a piccolo diametro sulla linea di scansione 24 (zona 4)	42
Figura 4.10 - Operazione di "migrazione" sulla linea di scansione 24 (zona 4)	43
Figura 4.11 - Test di penetrazione sulla linea di scansione 15 (zona 3)	44
Figura 4.12 - Sezione della zona 3	45
Figura 4.13 - Test di identificazione dei tubi a piccolo diametro sulla linea di scansione 15 (zona 4)	46
Figura 4.14 - Schermata del programma 3D Radar Examiner per impostare i parametri necessari ad effettuare l'operazione di "migrazione" nella zona 3	47
Figura 4.15 - Operazione di "migrazione" sulla linea di scansione 15 (zona 3)	48
Figura 4.16 - Sezione della zona 2	49
Figura 4.17 - Test di penetrazione sulla linea di scansione 11 (zona 2)	50
Figura 4.18 - Test di penetrazione sulla linea di scansione 5 – zona 1	51
Figura 4.19 - Sezione della zona 3	52
Figura 4.20 - Test di identificazione dei tubi a piccolo diametro sulla linea di scansione 9 (zona 1)	53
Figura 5.1 - Capacità di scattering dei tubi in metallo rispetto al rapporto tra il raggio dei tubi in metallo e alla lunghezza d'onda	56
Figura 5.2 – Deviazione del segnale dovuta dalla riflessione indotta dal passaggio attraverso l'interfaccia aria/terreno	57

Indice delle tabelle

Tabella 1.1 - Valori di costante dielettrica e di attenuazione mostrati dai materiali più comuni	3
Tabella 2.1 - Riepilogo dei materiali utilizzati nella zona 2 con relativi spessori	15
Tabella 3.1 - Caratteristiche principali dell'antenna V1821p	30
Tabella 3.2 - Caratteristiche principali dei dati acquisiti a Nantes	31
Tabella 4.1 - Tipologia degli strati e spessori relativi dei materiali presenti nella zona 2 degli strati	49

CAPITOLO 1

IL SISTEMA GEOSCOPE TM

Dopo una breve introduzione generale sul sistema GPR, in questo capitolo verranno proposte le caratteristiche e i principi di funzionamento del sistema GeoScope TM utilizzato per eseguire le elaborazioni presentate nel Capitolo 4.

Questo strumento infatti è da considerarsi un sistema GPR a tutti gli effetti ma sfrutta dei principi di invio e di ricezione del segnale del tutto differenti dai tradizionali sistemi GPR a impulso, in particolare per quanto concerne il funzionamento dell'antenna "air-coupled".

Queste differenze ne fanno uno strumento del tutto innovativo e, tramite il suo utilizzo, si sono potute effettuare misure in aree molto accidentate, dove non è possibile utilizzare un tradizionale sistema GPR a impulso.

1.1 Il principio di funzionamento e le principali caratteristiche del sistema GeoScope TM della 3D Radar

La metodologia GPR (Ground Penetrating Radar) permette di investigare la struttura e la composizione del suolo attraverso l'analisi delle riflessioni delle onde elettromagnetiche ad alta frequenza trasmesse nel terreno.

Il sistema GPR trasmette nel terreno impulsi elettromagnetici di una determinata frequenza tramite un trasduttore (antenna). L'impulso si propaga verticalmente nel terreno con una certa velocità; quando incontra un'interfaccia (superficie di contatto) parte dell'impulso viene riflessa verso la superficie. L'antenna riceve in superficie gli impulsi riflessi.

Il primo impulso distinguibile è legato al primo strato della superficie investigata mentre gli impulsi successivi sono legati alle anisotropie esistenti nel sottosuolo.

In base al tempo di arrivo degli impulsi riflessi e al valore stimato di alcune proprietà fisiche del substrato, il sistema elabora una stima dell'interfaccia rilevata.

Le proprietà fisiche dei materiali che governano la propagazione delle onde elettromagnetiche nel sottosuolo sono la *costante dielettrica* e l'*attenuazione*.

La prima proprietà è un parametro adimensionale che esprime il rapporto tra la velocità degli impulsi elettromagnetici nel vuoto ($3 \cdot 10^8$ m/s) e nel materiale preso in esame. Tramite questo parametro riusciamo a calcolare la profondità di una superficie riflettente.

L'attenuazione, espressa in dB/m, esprime la diminuzione dell'intensità di segnale per unità di lunghezza percorsa all'interno del materiale ed è riconducibile alla *conducibilità elettrica* del materiale in oggetto. Dalla tabella sottostante (**Tab. 1.1**), si può rilevare come la presenza di acqua sia responsabile dell'aumento dei valori di entrambi i parametri sebbene con intensità diversa nei vari materiali.

Materiale	Attenuazione (in dB/m)		Costante dielettrica	
	Secco	Bagnato	Secco	Bagnato
Asfalto	2-15	2-20	2-4	6-12
Argilla	10-20	20-100	2-10	4-40
Granito	0,5-3	2-5	5	7
Calcere	0,5-10	10-25	7	8
Sabbia	0,01-1	0,03-0,3	4-6	10-30

Cemento/mattoni	2-12	10-25	4-10	10-20
Terreno sabbioso	0,1-2	1-5	4-6	15-30
Terreno argilloso	0,3-3	5-30	4-6	10-15

Tabella 1.1 - Valori di costante dielettrica e di attenuazione mostrati dai materiali più comuni

1.2 Il principio di funzionamento e le principali caratteristiche del sistema GeoScope TM della 3D Radar

Il GPR GeoScopeTM (**Fig. 1.1**) è progettato per la mappatura del sottosuolo ad alta risoluzione a 3 dimensioni tramite l'utilizzo di una tecnologia radar estremamente innovativa; infatti essa è basata sulla metodologia "step-frequency", la quale sfrutta una sorgente di frequenza digitale al posto della tradizionale tecnologia "phase-locked loop".



Figura 1.1 - Unità di controllo 3D Radar GeoScope TM

Utilizzando questa nuova concezione, il GeoScopeTM è in grado di generare forme d'onda da 100 MHz a 3 GHz con un massimo di 1500 frequenze generate (lunghezza d'onda caratteristica pari a 0,5-10 millisecondi).

Il radar a tecnologia "step-frequency" ha un ricevitore coerente, il quale permette di utilizzare la lunghezza d'onda (in genere pochi millisecondi) per tutto il tempo di integrazione efficace. In confronto i GPR a impulso usano un campionamento stroboscopico che comporta una significativa perdita di energia.

Il radar è controllato da un computer portatile attraverso un cavo Ethernet.

Il sistema (**Fig. 1.2**) può anche essere configurato con interfaccia GPS (RS232C) per consentire la registrazione dei dati di posizione (NMEA-0183).

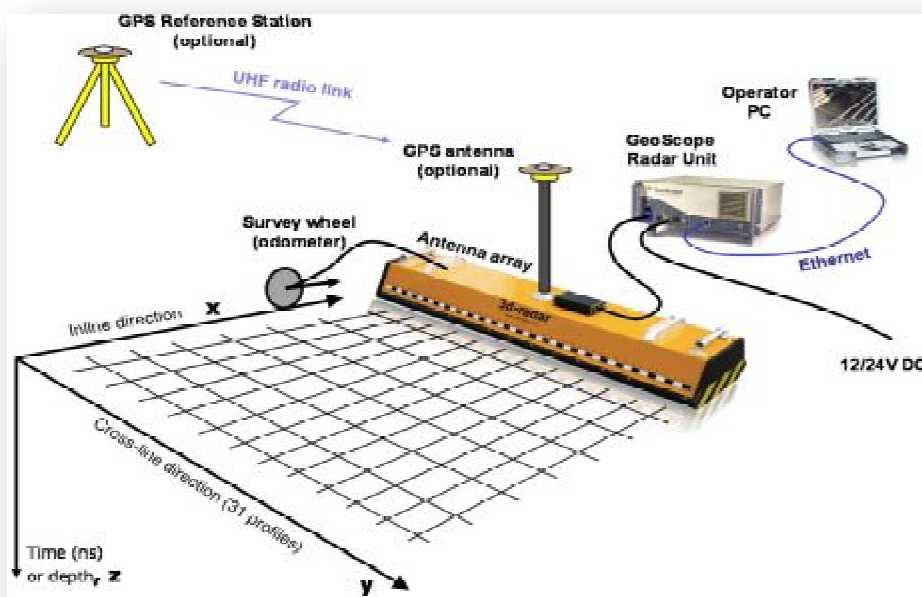


Figura 1.2 - Schema esemplificativo del sistema GeoScope TM

Il GPR GeoScopeTM è progettato per funzionare con una scannerizzazione che prevede l'utilizzo di massimo 31 antenne interne. Le antenne vengono analizzate in sequenza dall'unità radar.

L'antenna (**Fig. 1.3**) è concepita con una struttura "air-coupled" che prevede l'utilizzo di antenne trasmettenti Tx e riceventi Rx poste a una distanza molto limitata (10 cm di offset); questa configurazione permette di ottenere un'antenna quasi monostatica. Essendo un sistema "air-coupled", l'array di antenne permette indagini ad alta velocità e può essere utilizzato fino a 50 cm da terra.

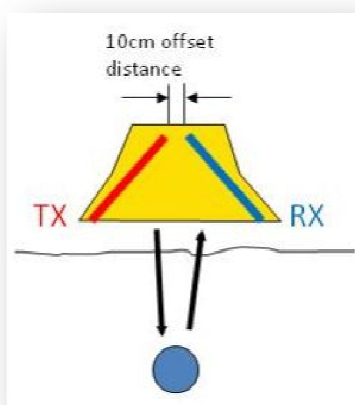


Figura 1.3 - Sezione dell'antenna utilizzata tramite sistema GeoScope TM

1.3 Le caratteristiche del sistema "step-frequency"

La "step-frequency" è una forma d'onda radar consistente in una serie di onde sinusoidali che crescono linearmente con la frequenza. Il radar misura la fase e l'ampiezza su ogni frequenza e utilizza una trasformata di Fourier inversa (IFT) di questi dati per costruire un profilo nel dominio del tempo (A-Scan).

In questo modo, il radar a tecnologia "step-frequency" raccoglie i dati nel dominio delle frequenze e converte i dati in dati nel dominio del tempo attraverso l'elaborazione del computer.

La forma d'onda che si ottiene utilizzando la metodologia "step-frequency" rappresenta perfettamente la firma del segnale d'origine con uno spettro di frequenza continuo e uniforme.

Il controllo informatico permette all'utente di impostare il tempo di permanenza (dwell time) su ogni frequenza, nonché di inizio e fine delle frequenze (**Fig. 1.4**).

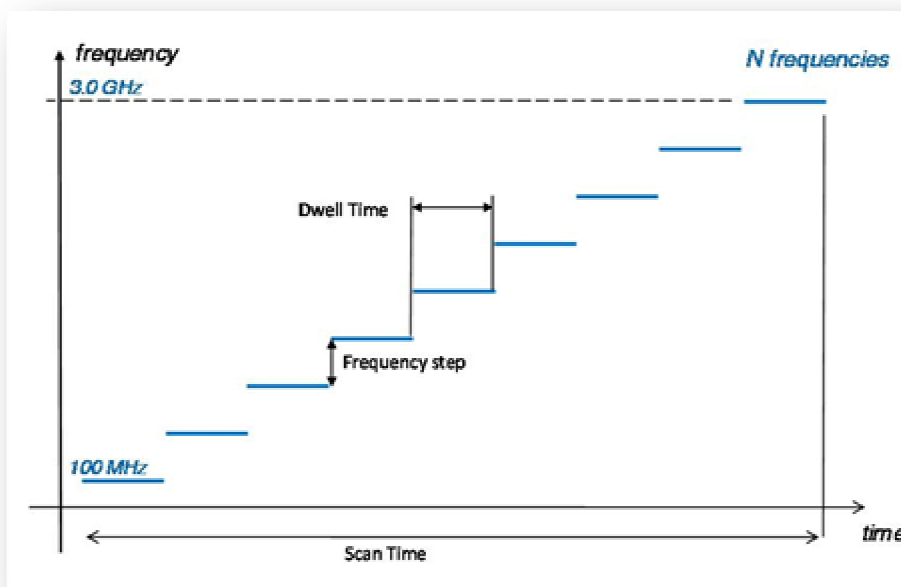


Figura 1.4 - Forma d'onda con metodologia "step frequency"

1.3.1 Le differenze tra i dati "step-frequency" rispetto a quelli provenienti da radar ad impulso

I radar ad impulso trasmettono impulsi molto brevi, con un tasso fisso di ripetizione degli stessi (PRF), e utilizzano il campionamento stroboscopico per costruire la traccia, nel dominio del tempo, di diversi impulsi successivi. Pertanto, i dati che si ottengono da un radar a impulso rappresentano la lettura diretta della riflessione nel dominio del tempo dal sottosuolo.

I dati ottenuti tramite l'utilizzo di un radar a step-frequency possono invece essere "memorizzati" sia nel dominio della frequenza che nel dominio del tempo (dopo l'utilizzo della trasformata di Fourier inversa (IFT)). I dati nel dominio del tempo di

un radar "step-frequency" sono equivalenti ai dati nel dominio del tempo da un impulso radar; tuttavia, i dati "step-frequency" consentono una maggiore possibilità di elaborazione nel campo delle frequenze.

I dati grezzi possono essere memorizzati tramite un formato proposto dalla 3D Radar sia nel dominio del tempo o nel dominio della frequenza, come già accennato precedentemente, per la post-elaborazione.

In opposizione alle tradizionali antenne GPR l'antenna utilizzata da questo sistema permette di avere una copertura continua di frequenza a partire da 100 MHz fino a 3 GHz (**Fig.1.5**).

In pratica, ciò permette all'utente di raccogliere i dati da 100 MHz a 3 GHz senza cambiare tipologia di antenna. Infatti, se avessimo usato un GPR a impulso per raccogliere dati su questo range di frequenza, avremmo dovuto usare 4 differenti tipologie di antenna: 200 MHz, 400 MHz, 800 MHz e 1600 MHz.

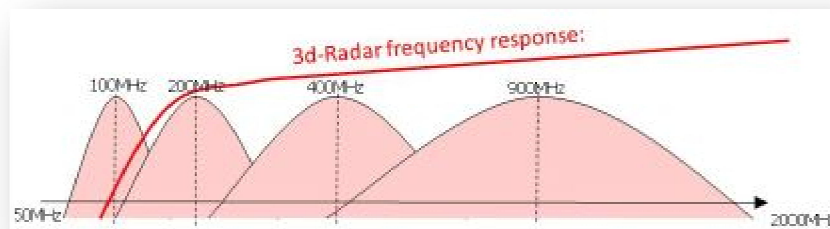


Figura 1.5 - Copertura in frequenza dell'antenna utilizzata dal sistema GeoScope TM rispetto alle tradizionali antenne GPR

Gli elementi che compongono l'antenna del sistema step-frequency sono disposti in un array lineare (**Fig. 1.6**), in cui le antenne di trasmissione e ricezione sono sfalsate le une dalle altre. Durante l'indagine, il radar combina l'antenna di trasmissione Tx in sequenza con quella in ricezione Rx per ottenere un numero differente di profili.

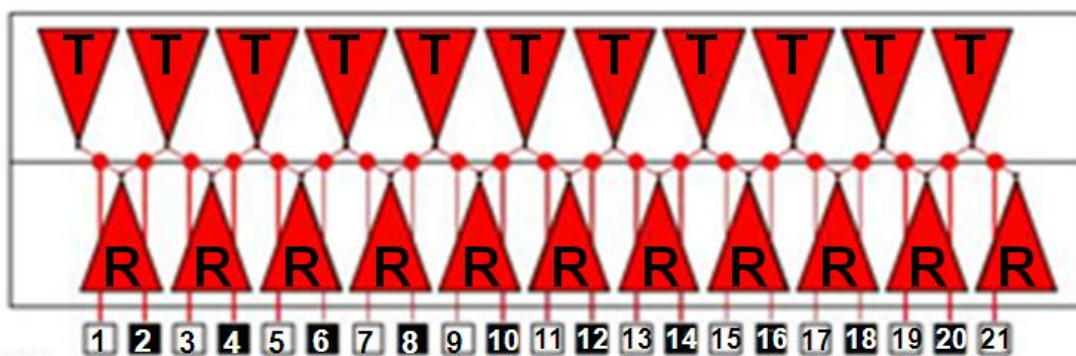


Figura 1.6 – Schema interno di un'antenna a 21 canali del sistema GeoScope TM

A seconda dell'applicazione il sistema può essere programmato per utilizzare tutte le antenne della matrice o solo una parte di esse.

La figura proposta a pagina successiva (**Fig. 1.7**) illustra le differenti modalità di acquisizione dei dati (a bassa o elevata risoluzione) al variare della velocità con la quale si esegue la scansione e al variare del numero di canali utilizzati.

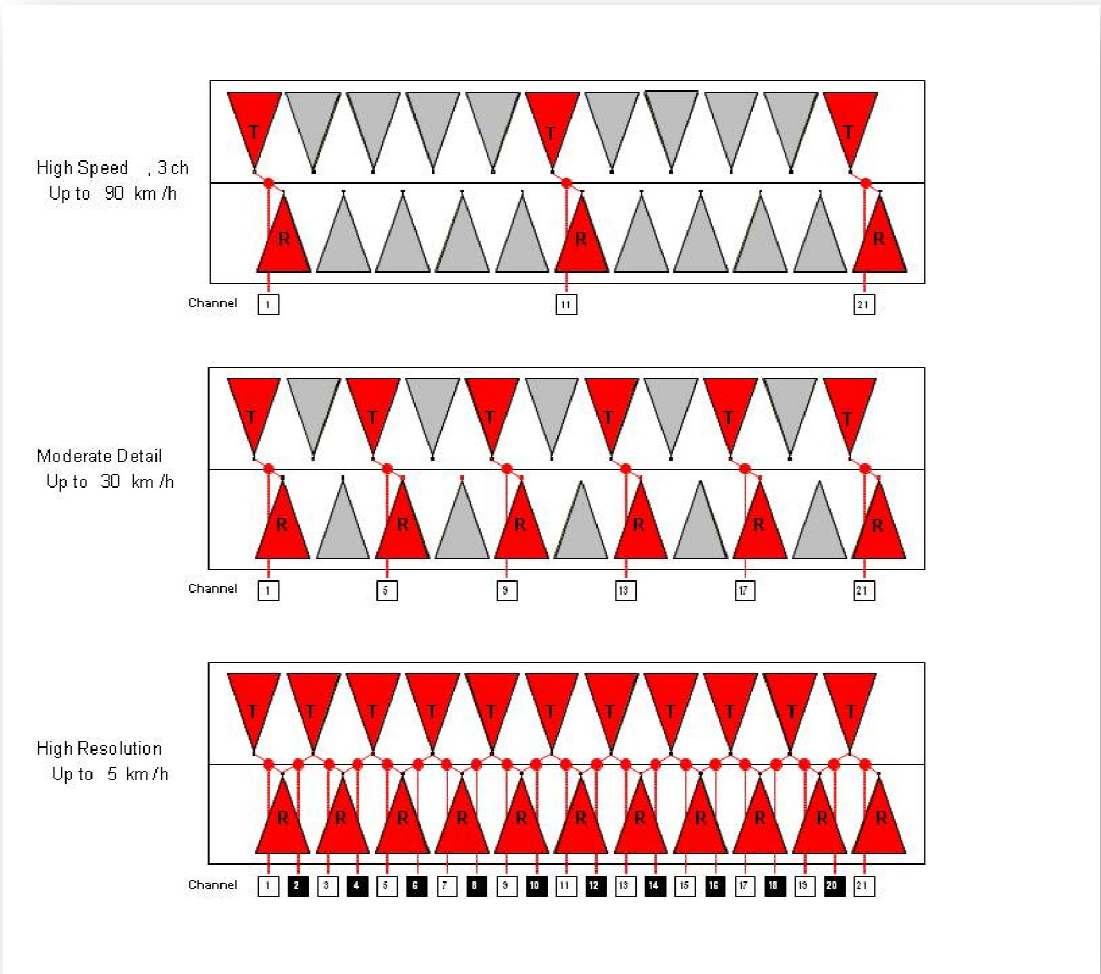


Figura 1.7 - Diversi metodi di acquisizione dei dati

CAPITOLO 2

IL TEST SITE DI NANTES

Il test site di Nantes è stato costruito presso il "Laboratoire Central des Ponts et Chaussées" dopo l'approvazione del progetto finale nel marzo del 1996 per poter constatare l'accuratezza dei metodi geofisici applicati.

Questo sito, infatti, può essere definito uno strumento scientifico "di riferimento" per permettere il confronto di metodi e processi geofisici.

Necessariamente limitato per ragioni economiche, è stato progettato per effettuare misure puntuali o lineari.

Questo sito è progettato su uno scavo di 30 m di lunghezza e di 5 m di larghezza del fondo con i lati inclinati in rapporto 2:1; la profondità utilizzabile varia tra i 3,30 m e i 4,70 m. Questa fossa è stata riempita con materiali diversi, disposti a fette trasversali, separati da un'interfaccia verticale (**Fig. 2.1**).

I materiali sono stati selezionati per essere rappresentativi delle diverse situazioni che possono incontrarsi nei complessi urbani (presenza di limo, sedimenti calcarei, oltre a ghiaia e sabbia), pur essendo questi materiali relativamente "puri" per consentire una migliore realizzazione delle misure.

Gli oggetti che sono stati interrati in questo sito sono rappresentativi di quelli che si trovano comunemente nel lavoro di scavo - tubazioni, cavità, massi e oggetti di varia misura. Questi ostacoli sono stati posizionati e identificati tramite l'utilizzo

di un sistema di riferimento geodetico locale; è stata costruita una banca delle loro posizioni. Inoltre, sono state adottate delle precauzioni per proteggere il sito dalle infiltrazioni sotterranee di acqua come, per esempio, la costruzione di uno scarico di fondo ricoperto da uno strato di geotessile di rinforzo.

2.1 Descrizione del sito

Il site test è costruito all'interno del "Centre de Nantes du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées" su un terreno con pendenza naturale di circa il 5%.

Questa pendenza ha permesso di realizzare un sito misto dove il fondo della fossa conserva una pendenza del 5%, quindi facilmente drenabile. Una delle sue estremità è stata lasciata aperta per permettere un'estensione ulteriore.

Il suolo di supporto è costituito da micascisti a pendenza quasi verticale e a scistosità perpendicolare alla pendenza.

Il site test è costituito da una fossa riempita di materie scelte all'interno delle quali sono interrati differenti tipi di oggetti. La fossa ha una profondità utile che va da 3,30 m a 4,70 m; lungo l'asse si ha una pendenza del 5%.

Il fondo della fossa ha 5 m di larghezza. I fianchi hanno una pendenza 2:1, la larghezza del livello superiore è compresa tra 19 m e 24,60 m e la pendenza della superficie è stata ridotta all' 1%.

I materiali di scavo sono stati in parte utilizzati per costruire le banchine laterali.

Il fondo della fossa viene drenato per mezzo di uno strato di 20 cm di ghiaia avvolto sia sopra che sotto da uno strato geotessile.

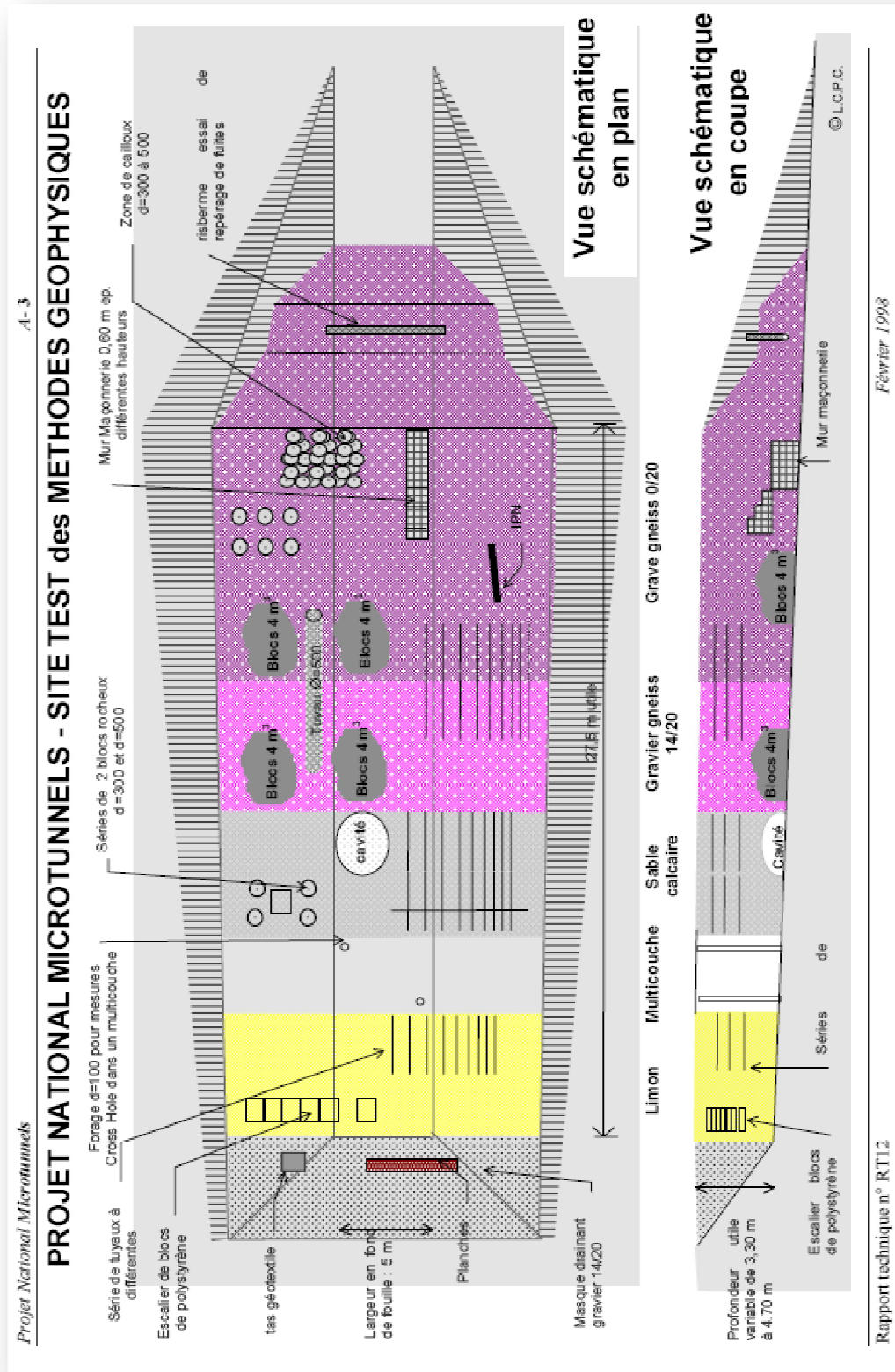


Figura 2.1 - Planimetria del test di Nantes

I materiali di riempimento sono disposti in "fette" trasversali secondo moduli da 2,50 metri di lunghezza così composti:

- ✓ uno strato di limo di 5 m → Zona 1
- ✓ una matrice multistrato di 2,50 m costituita da una "pila" di strati (con spessore variabile da 0,60 m a 1,30 m) → Zona 2
- ✓ uno strato di sabbia calcarea d'Arthon di 5 m → Zona 3
- ✓ uno strato di ghiaia gneiss 14/20 (per ottenere una bassa densità di circa 1,8 t/m³) di 5 m → Zona 4
- ✓ due strati di ghiaia gneiss 0/20 (per ottenere un'alta densità di circa 2,2 t/m³) per una lunghezza complessiva di 10 m
- ✓ un argine di 2,50 m all'estremità del sito

2.2 Zona 1 – Strato di Limo

Il limo utilizzato proviene da un cantiere della Strada Nazionale "12 Rennes – St Briec" nel luogo conosciuto come « Le Loup du Lac ».

Questo è un limo quaternario poco argilloso, dalla tipica colorazione giallo ocra.

Dall'analisi granulometrica si deduce che il 98% di questo materiale ha un diametro caratteristico inferiore agli 80 micron e che il 100% è inferiore ai 2 mm.

Questo limo ha una percentuale di acqua pari al 10% misurata tramite la metodologia del Proctor ottimo.

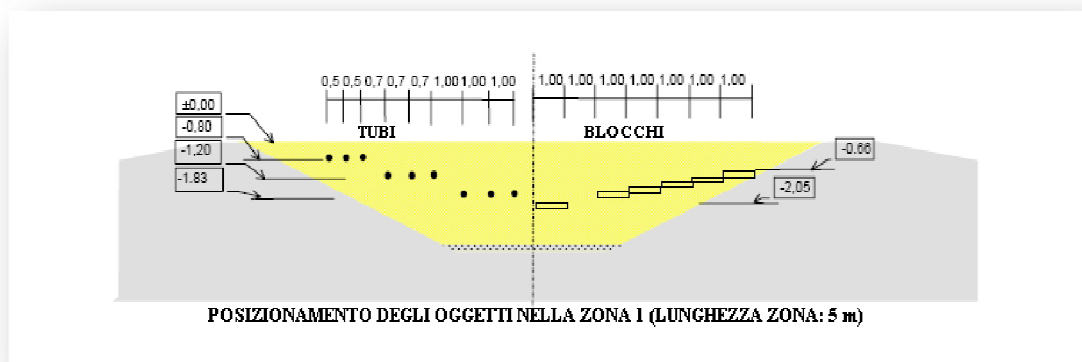


Figura 2.2 - Sezione della zona 1 contenente limo

Come è possibile notare dalla sezione proposta sopra (**Fig. 2.2**), in questa zona sono stati inseriti i seguenti oggetti:

- ✓ una scala di 6 blocchi di polistirolo espanso (1 x 1 x 0,25 m).
- ✓ 3 stendimenti, a profondità diverse, di tubi di lunghezza di 2,5 m a distanze tra loro crescenti con la profondità (**Fig. 2.3**).



Figura 2.3 - Posa degli stendimenti di tubi nella zona 1

Ogni stendimento è costituito di un tubo di acciaio vuoto (diametro pari a 80 mm), un tubo PVC pieno d'acqua (diametro pari a 100 mm) e un tubo PVC vuoto (diametro pari a 100 mm).

2.3 Zona 2 – Multistrato

In quest'area del sito è stato scelto di creare una matrice multistrato costituita da una "pila" di strati composta da materiali differenti (con spessore variabile da 0,60 a 1,30 metri), così da poter ricreare una eterogeneità di materiali che fosse rappresentativa delle condizioni che possono incontrarsi in area urbana (**Fig. 2.4**).

Le tipologie di materiale che compongono gli strati, con i loro relativi spessori, sono indicate nella tabella e nella sezione sotto riportate (**Tab. 2.1**).

Tipologia di materiale per strato	Spessore [m]
Sabbia calcarea d'Arthon	0,80
Ghiaia 0/20	0,60
Ghiaia 14/20	0,60
Sabbia calcarea d'Arthon	1,30
Limo	0,60

Tabella 2.1 - Riepilogo dei materiali utilizzati nella zona 2 con relativi spessori



Figura 2.4 - Sezione della zona 2 (multistrato)

Nella zona 2 sono stati inoltre inseriti 2 tubi verticali di PVC del diametro di 100 mm che possono essere utilizzati anche per il passaggio di sonde.

2.4 Zona 3 – Strato di sabbia calcarea d'Arthon

Le informazioni sulla natura di questo materiale sono state fornite da uno studio realizzato dal "Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers", nell'occasione degli studi sulla "Déviation d'Arthon".

Questo studio fornisce la seguente descrizione del materiale: "Sabbia beige silicea a grani fini e medi risalente all'era terziaria. Queste sabbie sono per la maggior parte consolidate tramite una cementazione a base di carbonati calcarei o dolomitici. Questa cementazione può essere di intensità e resistenza meccanica molto variabile. L'arenaria è essenzialmente poco cementata, molto friabile e si sfalda facilmente in sabbia. Nel cuore di questa massa poco cementata esistono dei blocchi solidi apparentemente a tutte le profondità e senza particolari allineamenti".

Dall'analisi granulometrica (**Fig. 2.5**) si deduce che questo materiale ha un diametro caratteristico inferiore agli 80 micron per un valore compreso tra il 13% e 19%

mentre il diametro massimo dei grani è rappresentato da un valore compreso tra 0,8 e 2 mm.

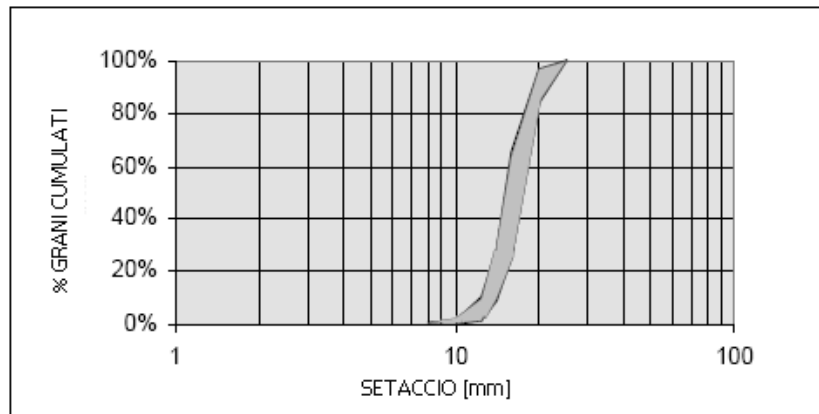


Figura 2.5 - Schema granulometrico della sabbia calcarea d'Arthon utilizzata nella zona 3

Questa sabbia calcarea ha una percentuale di acqua, misurata al momento della messa in opera tramite la metodologia del Proctor Ottimo, pari al 14 %.

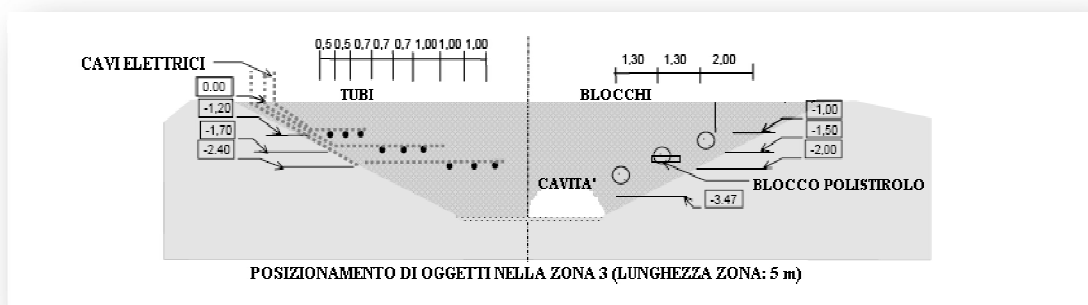


Figura 2.6 - Sezione della zona 3 contenente sabbia calcarea d'Arthon

Come è possibile notare dalla sezione proposta sopra (**Fig. 2.6**), in questa zona sono stati inseriti i seguenti oggetti:

- ✓ una cavità emisferica in polistirolo espanso (altezza pari a 0,5 m; diametro pari a 2,5 m)
- ✓ due blocchi isolati in gneiss con diametro rispettivamente di 300 mm e 500 mm posti a profondità differenti
- ✓ un blocco di polistirolo espanso (1 x 1 x 0,25 m)
- ✓ 3 stendimenti, a profondità diverse, di tubi di lunghezza di 2,5 m a distanze tra loro crescenti con la profondità (**Fig. 2.7**).



Figura 2.7 - Posa degli stendimenti di tubi nella zona 3

- ✓ In questa matrice di terreno è stato posato un cavo elettrico a grande sezione che può essere eventualmente alimentato

2.5 Zona 4 – Strato di ghiaia 14/20

La ghiaia utilizzata proviene dalla cava di Petit Mars, Chasse - Chemin des Masses BP 9 44850 St Mars du Désert.

Questa cava è stata oggetto di studio in vista dell'elaborazione del Piano Qualità (rapporto 13.95.44.10) del "Laboratoire Régional des Ponts et Chaussées d'Angers", da cui sono state tratte le seguenti informazioni.

I materiali costitutivi di questa cava sono qualificati dalla voce « Orthogneiss di St Mars du Désert ». Il gneiss (leptinite) contiene qualche banco di anfibolite "intrastrato" e ha la composizione dei graniti a due mica.

Lo schema granulometrico di questo materiale mostra appunto che il diametro rappresentativo di questo materiale è compreso tra i 14 e i 20 mm (**Fig. 2.8**).

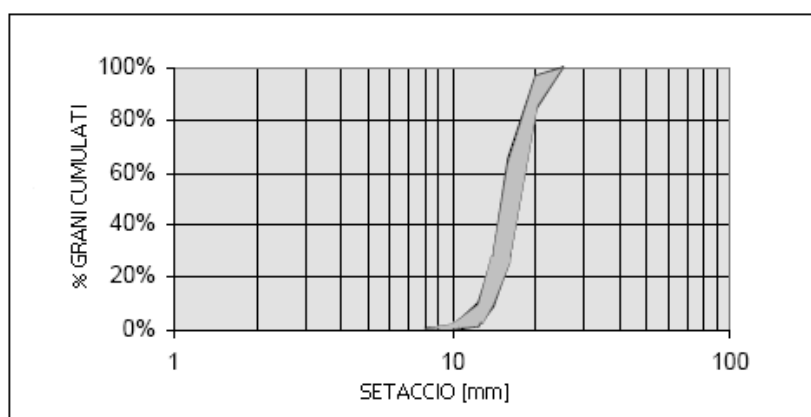


Figura 2.8 - Schema granulometrico della ghiaia 14/20 utilizzato nella zona 4

Come è possibile notare dalla sezione proposta a pagina successiva (**Fig. 2.10**), in questa zona sono stati inseriti i seguenti oggetti:

- ✓ 2 "dolmen" di circa 4 m³ costituiti da 3/4 blocchi di gneiss di base e da una lastra di copertura (**Fig. 2.9**).



Figura 2.9 - Tipologia dei dolmen di gneiss sotterrati nella zona 4

- ✓ un tubo in calcestruzzo (500 mm) di 2 m di lunghezza, vuoto (le estremità sono state occluse con delle placche di polistirolo)
- ✓ 3 stendimenti di tubi di 2,5 m disposti come descritto in precedenza

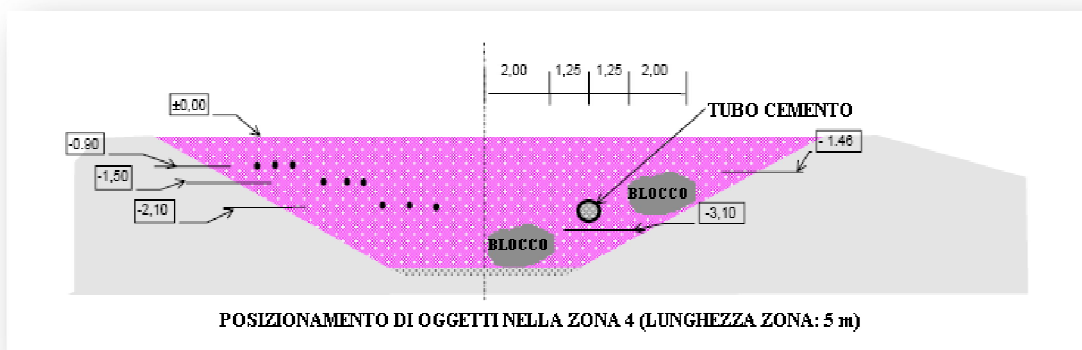


Figura 2.10 - Sezione della zona 4 contenente ghiaia 14/20

2.6 Zona 5 – Strato di ghiaia 0/20

Anche questa ghiaia proviene dalla cava di Petit Mars, Chasse – Chemin des Masses BP 9 44850 St Mars du Désert e presenta le stesse caratteristiche della ghiaia precedentemente descritta (a meno dello schema granulometrico).

Lo schema granulometrico di questo materiale mostra appunto che il diametro rappresentativo di questo materiale è compreso tra i 14 e i 20 mm (**Fig. 2.11**).

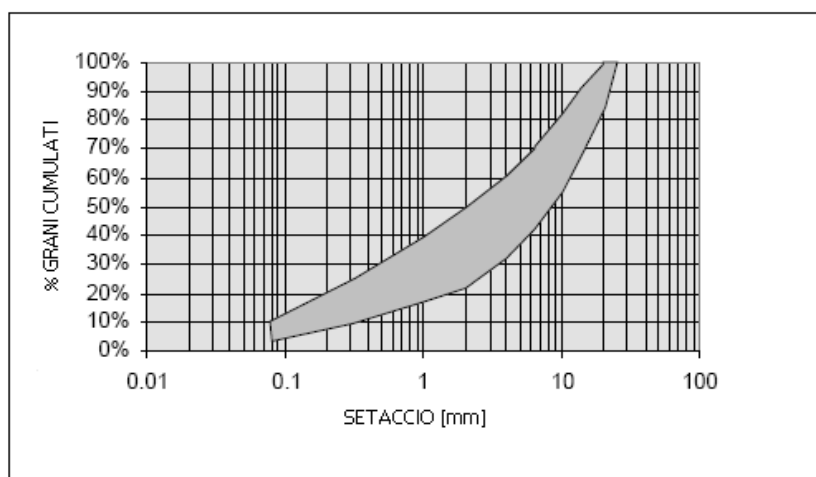


Figura 2.11 - Schema granulometrico della ghiaia 0/20 utilizzato nella zona 5

Come è possibile notare dalla sezione proposta a pagina successiva (**Fig. 2.13**), in questa zona sono stati inseriti i seguenti oggetti:

- ✓ 2 "dolmen" di circa 4 m³ costituiti da 3\4 blocchi di gneiss di base e da una lastra di copertura
- ✓ un tubo in calcestruzzo (500 mm) di 2 m di lunghezza, cavo all'interno
- ✓ 3 stendimenti di tubi di 2,5 m disposti come nelle altre matrici (**Fig. 2.12**)



Figura 2.12 - Posa degli stendimenti di tubi nella zona 5

- ✓ una parete in muratura costruito con blocchi forati (costituito da 3 gradini di 0,70 m di lunghezza e di 0,65 m di altezza)
- ✓ un ammasso di blocchi di roccia con diametro rispettivamente di 300 mm e 500 mm della stessa provenienza della ghiaia gneiss che lo circonda

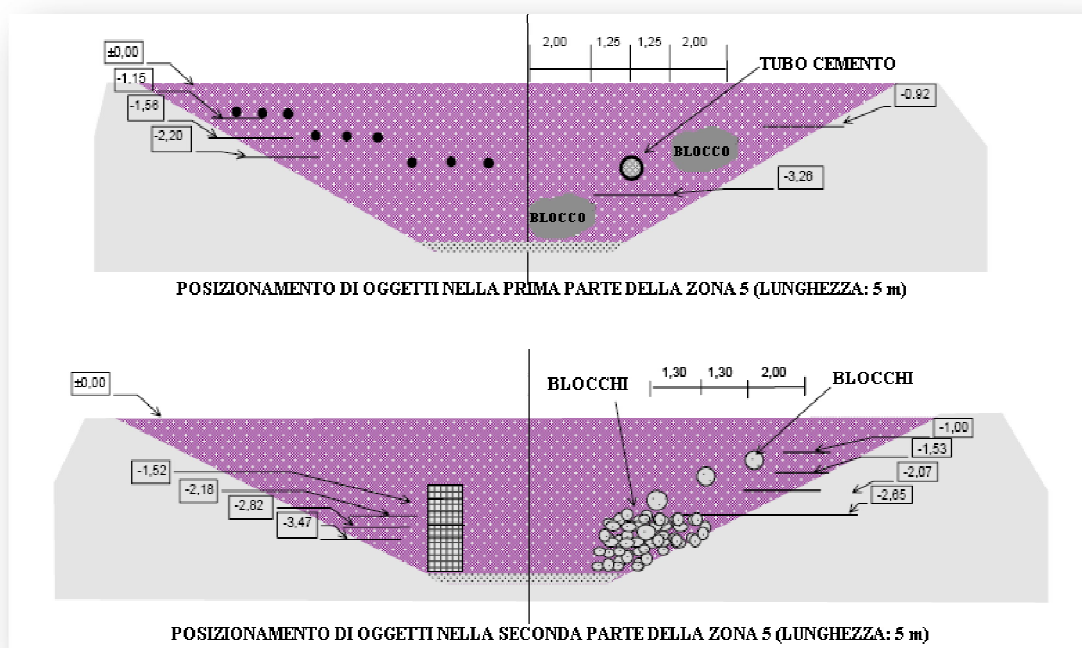


Figura 2.13 - Sezione della zona 5 contenente ghiaia 0/20

2.7 Disposizione per la protezione contro le infiltrazioni di acqua nel sito

La protezione dalle infiltrazioni d'acqua è un problema essenziale per la costituzione di un site test, anche se spesso bisogna cercare un compromesso soddisfacente tra questo obiettivo e la disponibilità economica.

Una soluzione per il sito di Nantes sarebbe stata quella di rendere il sito completamente impermeabilizzato, sia dal basso (tramite l'utilizzo di geomembrane) sia dall'alto (tramite cementificazione); questa prospettiva è stata però subito scartata dai tecnici e responsabili del sito a causa dell'elevato costo di realizzazione che avrebbe comportato.

La possibilità di arrestare il flusso d'acqua superficiale può essere allora progettato in questi altri diversi modi:

- ✓ telo removibile in superficie
- ✓ telo sepolto sotto 10 cm di sabbia stabilizzante
- ✓ doppia guarnizione parziale

La soluzione del telo removibile ha il merito di essere semplice e poco costosa ma non bisogna ignorare anche gli eventuali svantaggi che essa comporta: deve infatti essere progettato un efficace piano di fissaggio per resistere ai forti venti presenti nella regione di Nantes, prevedendo anche di monitorare periodicamente la situazione del telo.

Il telo interrato, invece, sembra essere la soluzione meno costosa e più vantaggiosa per l'operazione. Infatti, ricoperto da uno strato di sabbia stabilizzante, non dovrebbe essere monitorato e potrebbe essere protetto dalle piante infestanti che crescerebbero sulla sabbia tramite l'uso di un diserbante. Il grande svantaggio che ne deriverebbe da questa soluzione è che inficerebbe o addirittura non

permetterebbe di effettuare le misure effettuate tramite metodi elettrici, quali il GPR.

Gli esperimenti condotti presso il "Laboratoire Central des Ponts et Chaussées" sulle strade che utilizzano bistrati classici semi-impermeabili mostrano che almeno il 30% di acqua piovana fluisce nel terreno sottostante. Questa soluzione, quindi, è stata immediatamente scartata perché non fornisce una soluzione accettabile per le condizioni idriche richieste per il test site di Nantes.

In conclusione, la soluzione adottata è stata quello del telo removibile, nonostante i suoi svantaggi; il mantenimento del telo al suolo è stato realizzato sfruttando una guarnizione in gomma isolante.

Il drenaggio viene invece effettuato per mezzo di uno strato di ghiaia 14\20 di 20 cm ricoperto da uno strato geotessile. Quest'ultimo è disposto lungo tutta la lunghezza del fondo vasca ed in questo strato sono stati posti 2 tubi di drenaggio in PVC lisci del diametro di 10 cm.

Il drenaggio sui fianchi della vasca è invece formato da 3 strati (**Fig. 2.14**): un geotessile come strato anticontaminante (BIDIM 300), una griglia (TENAX) per assicurare la stabilità del terreno ed infine un altro strato di geotessile (BIDIM 300) per assicurare la permeabilità.



Figura 2.14 - Lavori di posa degli strati geotessili sul fianco della vasca

2.8 Riempimento della fossa

Una volta che è stato scavato il fossato ed è stato creato il sistema di drenaggio, il riempimento è stato eseguito con strati di 20–25 cm tramite l'utilizzo di un automezzo con benna (Fig. 2.15).



Figura 2.15 - Lavori di riempimento dello scavo tramite l'utilizzo di un automezzo con benna

Una volta posato lo strato di materiale è stata avviata una procedura di compattazione, utilizzando un compattatore vibrante.

Questa procedura è stata utilizzata fino al completo riempimento del sito e, al termine di questa operazione, sono state segnate:

- ✓ una linea di perimetrazione del sito
- ✓ una linea indicante i bordi della fossa

- ✓ una linea di confine per ogni zona del sito

Il sito è stato inoltre dotato di una cabina in legno (la scelta di questo materiale è stata fatta per limitare il suo impatto sulle misurazioni elettromagnetiche), situata ai margini del sito. La cabina viene utilizzata per ospitare le apparecchiature durante gli esperimenti.

CAPITOLO 3

METODOLOGIA DI ACQUISIZIONE ESEGUITA A

NANTES

Le acquisizioni effettuate presso il “Laboratoire Central des Ponts et Chaussées” sono state eseguite dai dipendenti della 3D Radar con la collaborazione del personale del test site di Nantes.

Queste misure sono state effettuate scansionando il sito 27 volte per coprire la lunghezza di 27,5 m del sito solo in direzione Est-Ovest; questo implica che sulla stessa linea di scansione si è fatta un'unica misura partendo da Est e, per la linea di scansione successiva, si è ripartiti sempre dalla stessa parte della scansione precedente, cioè sfruttando la direttrice Est-Ovest (**Fig. 3.1**).

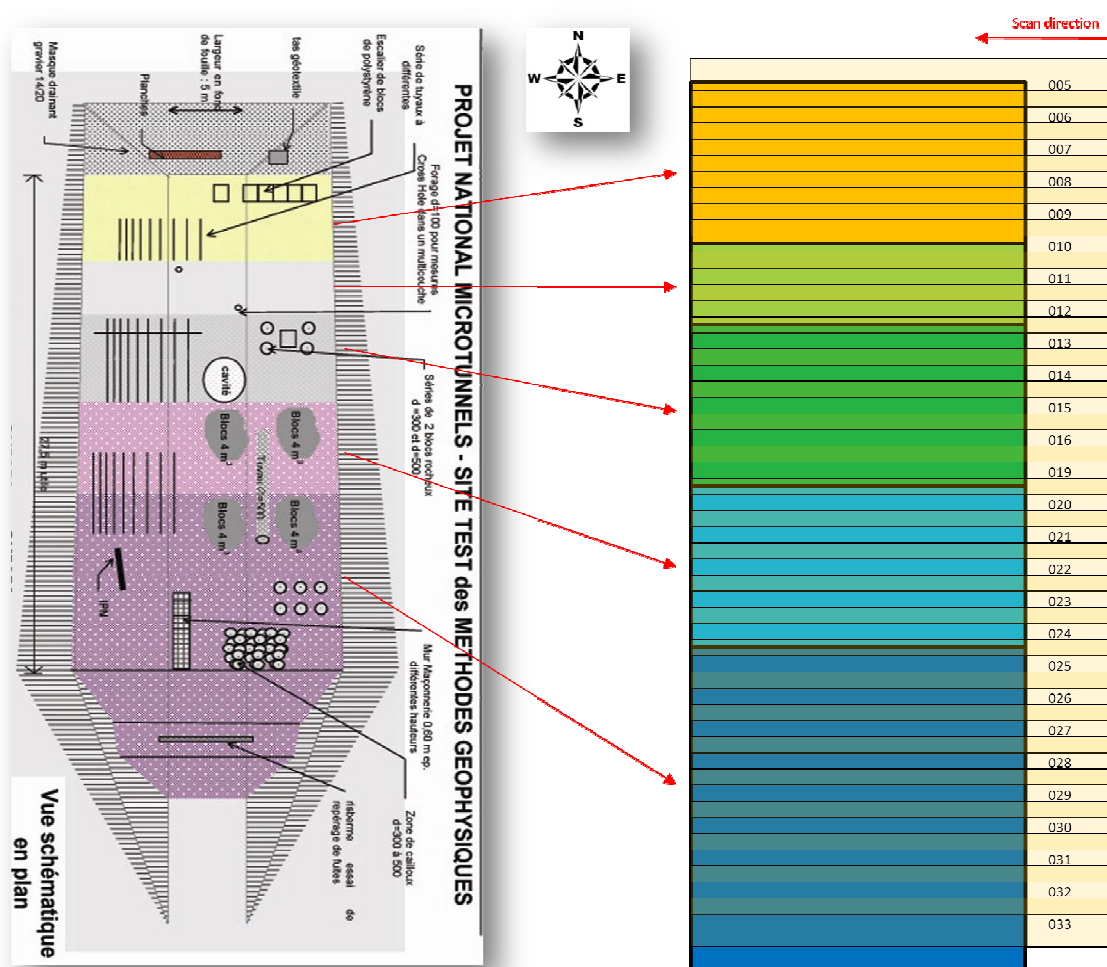


Figura 3.1 - Schema di acquisizione utilizzato nel sito di Nantes

Come già accennato nel Capitolo 1, la strumentazione utilizzata per effettuare queste misure è un “GPR step-frequency” Geoscope TM della 3D Radar che lavora su un range di frequenza che va dai 100 MHz fino ai 3 GHz.

La strumentazione GPR Geoscope TM utilizzata (**Fig: 3.2 – Fig: 3.3**) è composta da:

- ✓ Unità di controllo Geoscope GS3F da 3GHz
- ✓ Personal Computer con CPU Intel Core da 1.8 GHz collegato all’unità di controllo Geoscope tramite cavo Ethernet

-
- ✓ Antenna serie V modello 1821p
 - ✓ Carrello di trasporto a 4 ruote + Manubrio direzionale a 1 ruota



Figura 3.2 - Fase di montaggio del sistema GeoScope TM utilizzato a Nantes



Figura 3.3 - Sistema GeoScope TM utilizzato a Nantes

L'antenna utilizzata per effettuare questo lavoro, come già accennato in precedenza, è la V1821p (**Fig. 3.4**). Questa particolare antenna possiede 21 canali, con una spaziatura tra i canali di 7,5 cm, e i canali che la compongono sono posizionati in direzione parallela a quella di scansione (polarizzazione lineare in-line).

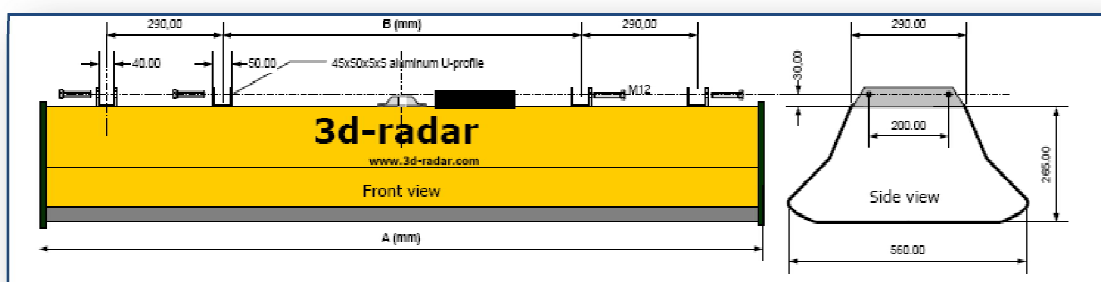


Figura 3.4 - Schema dell'antenna V1821p

Nella tabella proposta di seguito (**Tab. 3.1**) vengono riportate le caratteristiche specifiche dell'antenna V1821p.

Dimensioni	1810x560x310 mm
Peso dell'antenna	32 kg
Range di frequenza	100 - 3000 MHz
Numero di canali	21
Spaziatura dei canali (Crossline)	75 mm
Larghezza effettiva di scansione	1575 mm
Soppressione dell'onda diretta	> 43 dB
Polarizzazione	Lineare (direzione in-line)

Tabella 3.1 - Caratteristiche principali dell'antenna V1821p

Tramite l'utilizzo di questa strumentazione, si è potuto procedere all'analisi dell'intera area, generando 27 files che sono stati elaborati tramite l'utilizzo del software dedicato "3D Radar Examiner".

Le caratteristiche principali di questi dati gestiti tramite la creazione di 27 files in formato "3dr viewer" vengono riproposti nella tabella sottostante (**Tab. 3.2**)

Numero linee di scansione	27
Dimensione dell'altezza della linea di scansione	Fissa (1.575 m) con overlapping pari a 0,56 m
Dimensione della base della linea di scansione	Variabile (da 24 m a 24.8 m)
Dominio	Frequenza
Minima frequenza	100 MHz
Massima frequenza	3000 MHz
Step di frequenza	2 MHz
Intervallo di campionatura	0,05 m
Dwell time	3 μ s
Time window	177 ns

Tabella 3.2 - Caratteristiche principali dei dati acquisiti a Nantes

CAPITOLO 4

TEST ESEGUITI SUL SISTEMA GEOSCOPE TM

Al fine di testare il sistema Geoscope TM in modo da poter mettere in luce l'affidabilità di indagine di questa tecnologia, si è deciso di effettuare 2 tipologie differenti di test per le 5 zone che caratterizzano il sito di Nantes :

- ✓ Test di penetrazione del radar
- ✓ Test di identificazione dei tubi a diametro ridotto posti a diverse profondità

Eseguendo questi test, che solitamente vengono utilizzati anche per testare la precisione di indagine dei normali GPR impulsivi, abbiamo la possibilità di:

- ✓ Valutare la profondità di investigazione del radar nei diversi materiali presenti nel sito
- ✓ Valutare la risoluzione con la quale vengono identificati i tubi anche in condizioni di acquisizione non ottimali, cioè quando l'asse dei dipoli che compongono l'antenna (sia antenne Tx che antenne Rx hanno geometria di acquisizione verticale) è parallela alla direzione di acquisizione (in-line).

-
- ✓ Valutare la ricostruzione della forma del tubo investigato tramite l'operazione di "migrazione" effettuata con software dedicato

Con il termine di "migrazione", in geofisica applicata, si intende un metodo di analisi che, tenendo conto della velocità di propagazione delle onde nei diversi materiali incontrati e della geometria del lobo di emissione dell'antenna, permette di ricondurre le riflessioni alla loro effettiva posizione sulla sezione e di ricostruire la forma degli oggetti colpiti dal segnale radar.

Anche se il sito presenta la possibilità di investigare svariati oggetti si è deciso di concentrare i nostri sforzi sui tubi a piccolo diametro perché risultano essere quelli di più difficile ritrovamento nelle indagini radar; questo fattore verrà spiegato nel capitolo conclusivo in maniera dettagliata.

Nei paragrafi successivi, verrà proposta l'applicazione di questi test per tutte e 5 le zone presenti nel sito di Nantes, così da poter mostrare il comportamento di questa strumentazione su un campione eterogeneo di materiali.

4.1 Test di penetrazione nella zona 5 – Ghiaia 14/20

In questa prima zona da noi analizzata sappiamo che la profondità media dello scavo risulta essere intorno ai 4,5 metri e che la composizione è ghiaiosa con un diametro caratteristico compreso tra i 14 e i 20 mm.

Considerando le informazioni suggerite dai report eseguiti durante le rilevazioni, abbiamo impostato sul programma "3D Radar Examiner" la costante dielettrica ϵ a un valore pari a 4.

Impostando poi un guadagno sferico SEC con costante di attenuazione pari a 0.05, per cercare di ottenere un'immagine con la migliore risoluzione possibile, e applicando un filtro BGR (Passa Alto) abbiamo ottenuto il layout della linea di scansione 26 (**Fig. 4.1**)

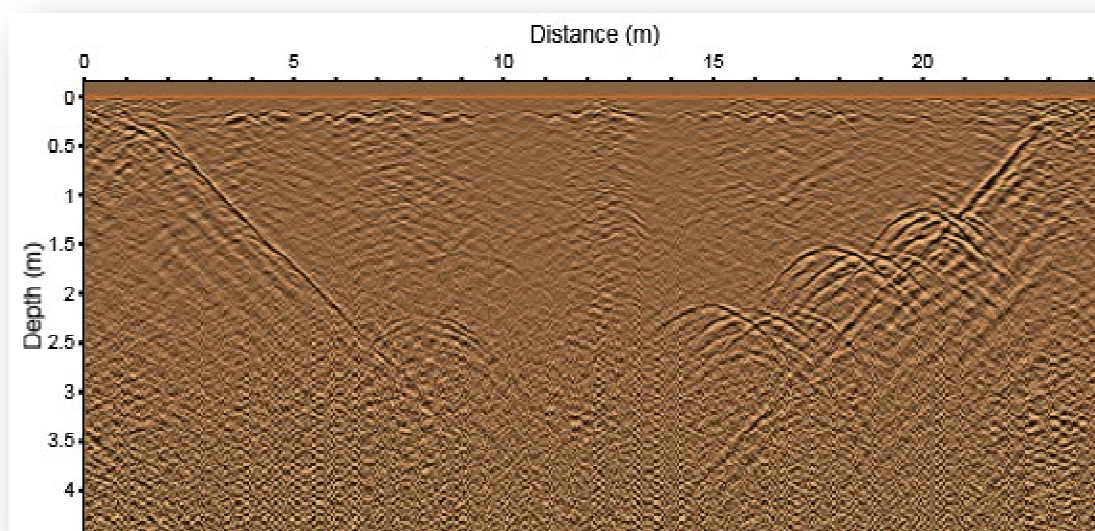


Figura 4.1 - Test di penetrazione sulla linea di scansione 26 (zona 5)

Da questa immagine possiamo dedurre che il segnale ha una buona penetrazione fino a una profondità $z = 3,6$ m e che successivamente il segnale si perde a causa dell'attenuazione data dal decadimento imposto dal terreno; nonostante questo si ha una buona visualizzazione dei fianchi dello scavo (linee oblique che tagliano l'immagine).

4.2 Test di identificazione dei tubi a piccolo diametro nella zona 5

Come per il test di penetrazione, abbiamo impostato il valore della costante dielettrica al valore 4 ed eseguito l'elaborazione dopo aver aggiunto un guadagno sferico SEC e un filtro BGR (Passa Alto). Come possiamo notare dalla sezione proposta a pagina successiva (**Fig. 4.2**) le 3 serie di tubi si trovano a 3 profondità diverse:

- ✓ Primo stendimento a $z = 1,15$ metri;
- ✓ Secondo stendimento a $z = 1,56$ metri;
- ✓ Terzo stendimento a $z = 2,20$ metri;

Come già specificato nel Capitolo 2, ogni stendimento è sempre composto da:

- ✓ un tubo in PVC riempito d'acqua con diametro di 10 cm (sempre posto più internamente rispetto agli altri);
- ✓ un tubo in PVC vuoto con diametro di 10 cm;
- ✓ un tubo in metallo con diametro di 8 cm;

Nella figura presentata a pagina successiva (**Fig. 4.3**) viene presentato il layout della linea di scansione 26.

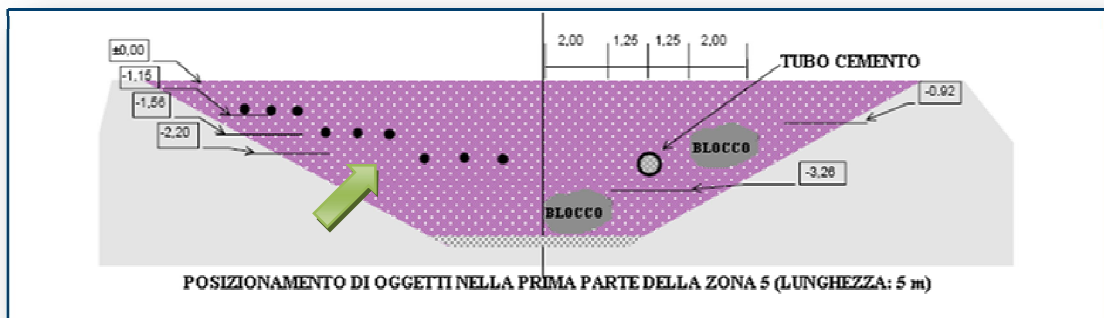


Figura 4.2 - Sezione della zona 5

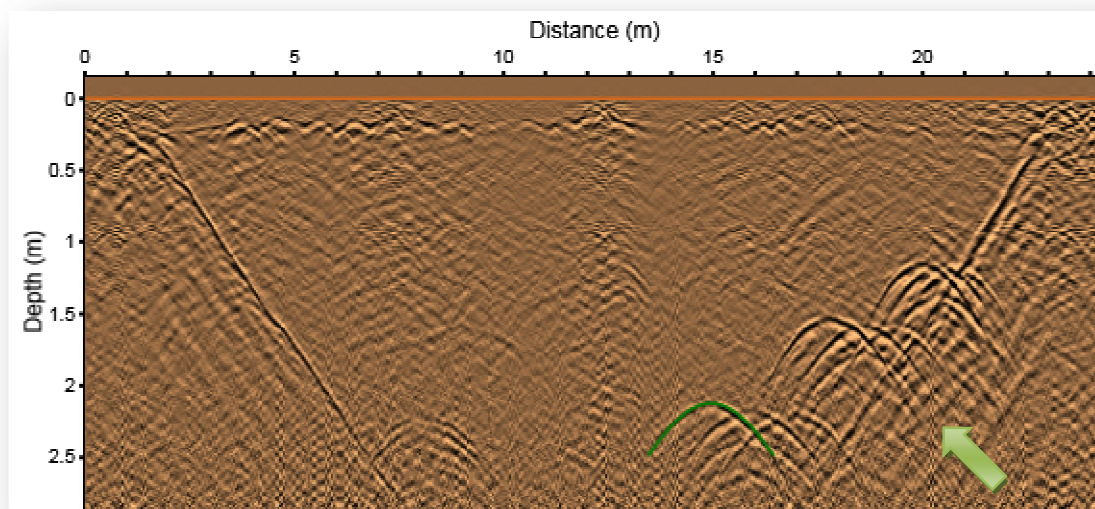


Figura 4.3 - Test di identificazione dei tubi a piccolo diametro sulla linea di scansione 26 (zona 5)

Osservando la figura 4.3 possiamo concludere che con questa tipologia di elaborazione riusciamo a individuare correttamente le profondità alla quale si trovano le 3 serie di tubi, ottenendo anche un'ottima visualizzazione delle iperbole di riflessione (nonostante il disturbo dato dai fianchi dello scavo).

A dispetto di ciò dobbiamo sottolineare che si evidenzia una leggera attenuazione dell'iperbole generata dalla riflessione con il tubo di metallo.

Dopo aver concluso questo test abbiamo effettuato l'operazione di migrazione, impostando alcuni parametri fondamentali per poter eseguire questo delicato passaggio. Infatti, per poter ricostruire in maniera corretta la forma di un oggetto, è necessario "fittare" un'iperbole di riflessione con un'iperbole sintetica generata dal programma "3D Radar Examiner" (come mostrato in verde nella Fig. 4.3).

I parametri che devono essere impostati, oltre alla nostra costante dielettrica ϵ , sono:

- ✓ l'*half angle* corrispondente alla metà dell'angolo di un triangolo che inscrive l'iperbole di riflessione nel suo vertice di generazione;

- ✓ il *max radius* corrispondente all'altezza del triangolo che inscrive l'iperbole di riflessione, valutata nel vertice di generazione dell'iperbole stessa.

Nel nostro caso questi 2 parametri sono stati impostati al valore di 60° e 1,5 metri, come mostrato nella figura sottostante (**Fig. 4.4**).

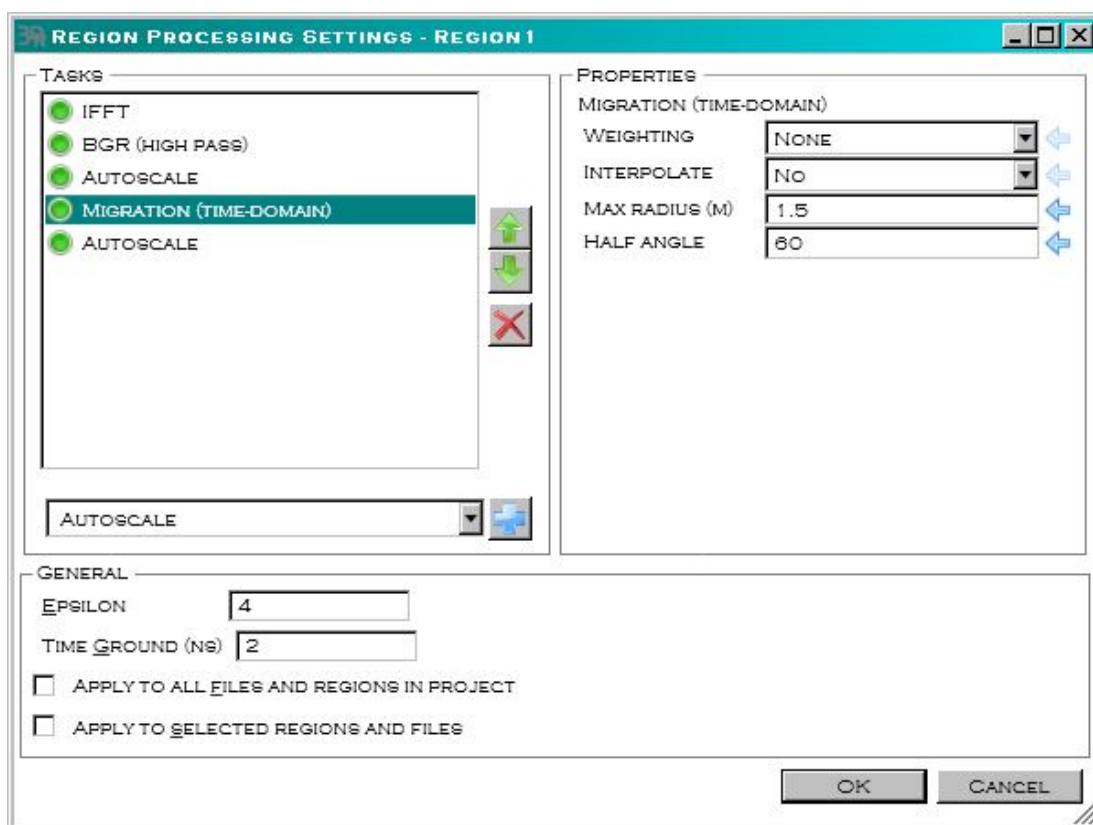


Figura 4.4 - Schermata del programma 3D Radar Examiner per impostare i parametri necessari ad effettuare l'operazione di "migrazione" nella zona 5

Dopo aver effettuato l'elaborazione con il seguente setting di parametri abbiamo ottenuto il layout della linea di scansione 26, proposto a pagina successiva (**Fig. 4.5**).

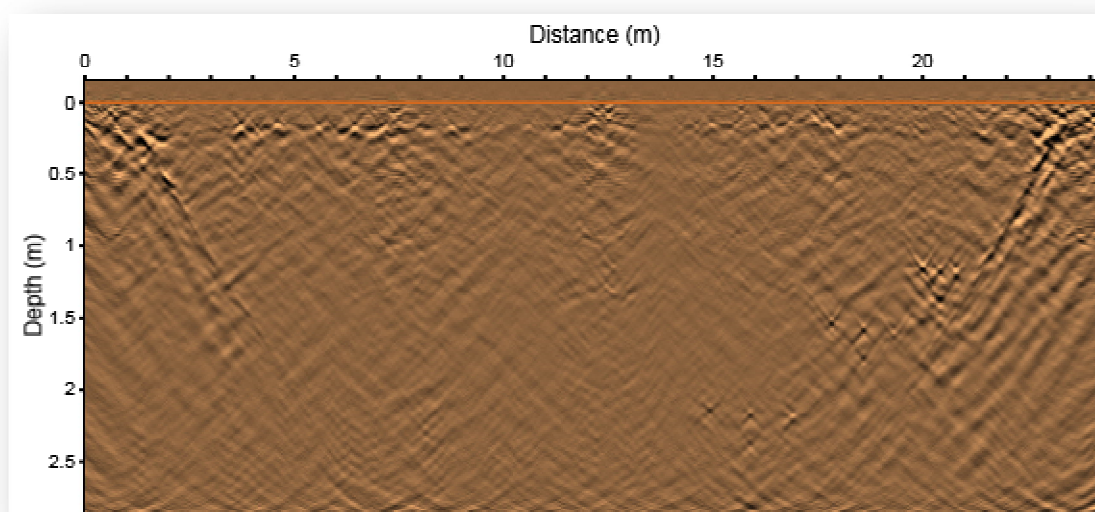


Figura 4.5 - Operazione di "migrazione" sulla linea di scansione 26 (zona 5)

Osservando la figura 4.5 possiamo concludere che si ottiene una buona ricostruzione della forma dei tubi in PVC con acqua e del loro diametro ricostruito (diametro = 10 cm); si evidenzia però una non perfetta ricostruzione della forma dei tubi in PVC senz'acqua tramite l'operazione di migrazione (si verifica il fenomeno di "sdoppiamento" del tubo) e la perdita di risoluzione del segnale generato dal tubo in metallo con la profondità (z maggiore di 1 metro).

4.3 Test di penetrazione nella zona 4 – Ghiaia 0/20

In questa seconda zona da noi analizzata sappiamo che la profondità media dello scavo risulta essere intorno ai 4,2 metri e che la composizione è ghiaiosa con un diametro caratteristico che arriva fino a 20 mm.

Considerando le informazioni suggerite dai report eseguiti durante le rilevazioni, abbiamo impostato sul programma "3D Radar Examiner" la costante dielettrica ϵ a un valore pari a 4,5.

Impostando poi un guadagno sferico SEC con costante di attenuazione pari a 0.05, per cercare di ottenere un'immagine con la migliore risoluzione possibile, e applicando un filtro BGR (Passa Alto) abbiamo ottenuto il layout della linea di scansione 24 (**Fig. 4.6**).

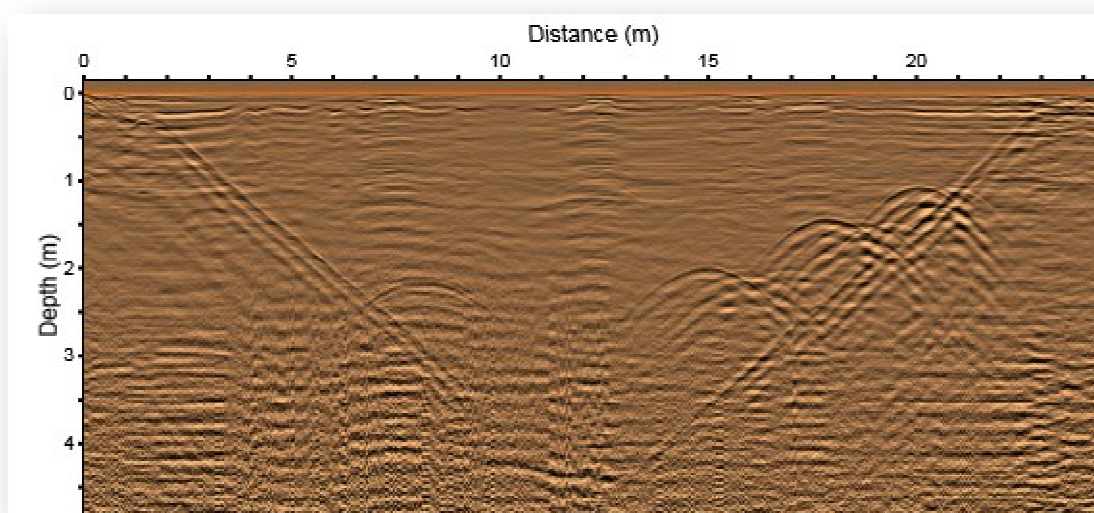


Figura 4.6 - Test di penetrazione sulla linea di scansione 24 (zona 4)

Da questa immagine possiamo dedurre che una si ha un'ottima penetrazione del segnale fino a fondo scavo (profondità z pari a 4,3 metri) e che, di conseguenza, il decadimento del segnale con la profondità è molto scarso (attenuazione del segnale debole); la visualizzazione dei fianchi dello scavo risulta essere ottimale

4.4 Test di identificazione dei tubi a piccolo diametro nella zona 4

Come per il test di penetrazione, abbiamo impostato il valore della costante dielettrica ϵ al valore 4,5 ed eseguito l'elaborazione dopo aver aggiunto un guadagno sferico SEC e un filtro BGR (Passa Alto).

Come possiamo notare dalla sezione sotto (**Fig. 4.7**) le 3 serie di tubi si ripropongono come nello schema proposto nella zona 5 ma si trovano a 3 profondità diverse:

- ✓ Primo stendimento a $z = 0,90$ metri;
- ✓ Secondo stendimento a $z = 1,50$ metri;
- ✓ Terzo stendimento a $z = 2,10$ metri;

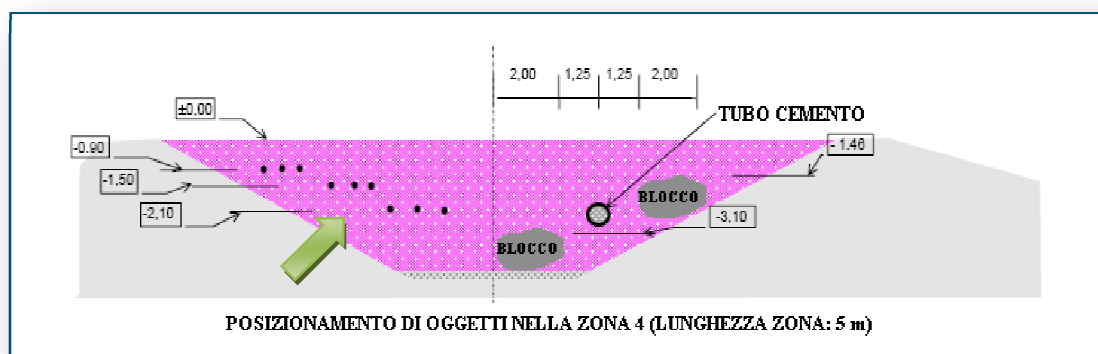


Figura 4.7 - Sezione della zona 4

Nella figura presentata a pagina successiva (**Fig. 4.8**) viene presentato il layout della linea di scansione 24.

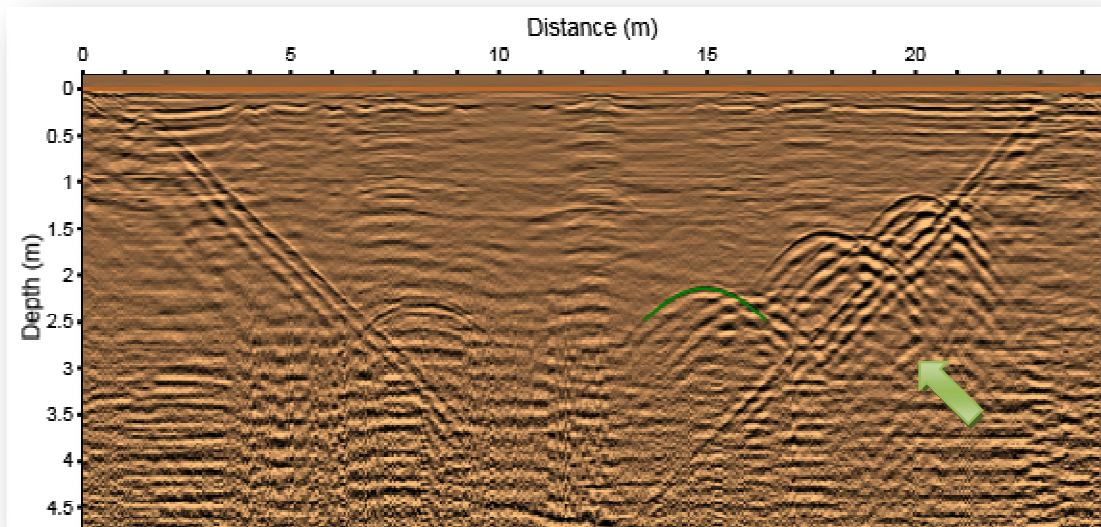


Figura 4.8 - Test di identificazione dei tubi a piccolo diametro sulla linea di scansione 24 (zona 4)

Osservando la figura 4.8 possiamo concludere che con questa tipologia di elaborazione riusciamo a individuare correttamente le profondità alla quale si trovano le 3 serie di tubi, ottenendo una quasi perfetta visualizzazione delle iperboli di riflessione (nonostante il disturbo dato dai fianchi dello scavo).

A dispetto di ciò dobbiamo sottolineare che si evidenzia una leggera attenuazione dell'iperbole generata dalla riflessione con il tubo di metallo.

Dopo aver concluso questo test abbiamo effettuato l'operazione di migrazione, come avvenuto nella zona 5, impostando la costante dielettrica ϵ ad un valore di 4.5, l'half angle ad un valore di 60° e il max radius ad un valore di 1,6 m (**Fig. 4.9**).

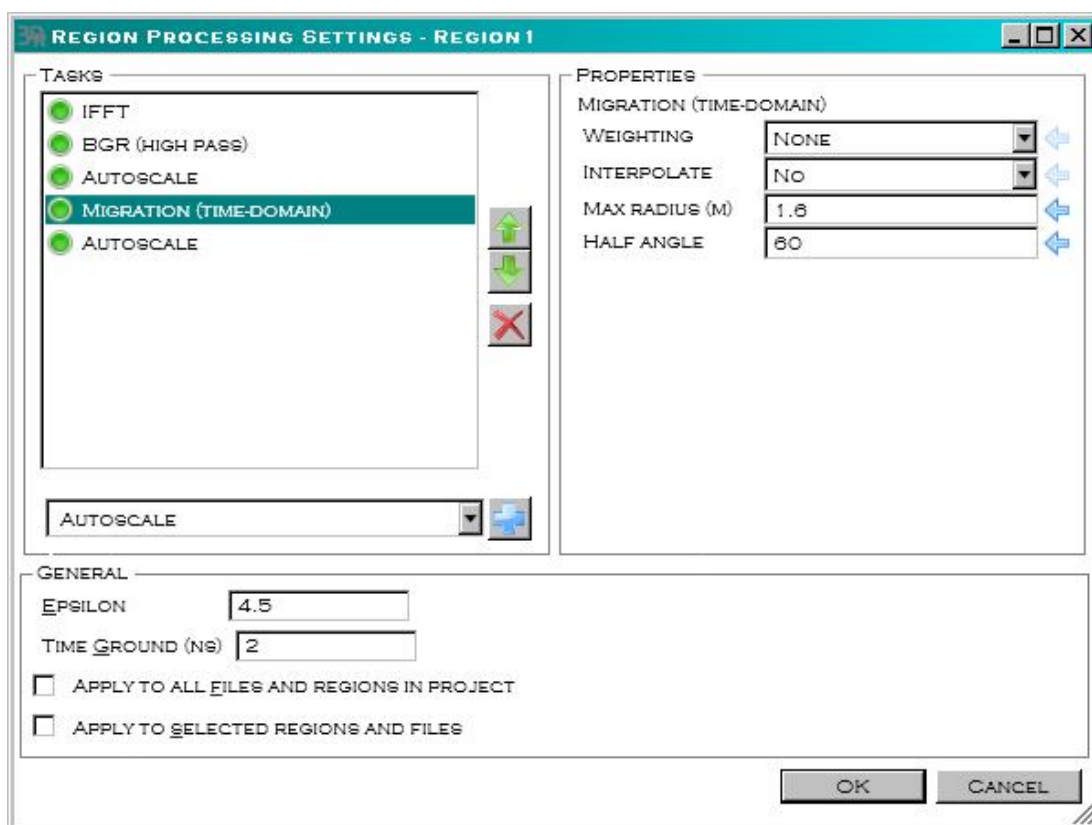


Figura 4.9 - Test di identificazione dei tubi a piccolo diametro sulla linea di scansione 24 (zona 4)

Dopo aver effettuato l'elaborazione con il seguente setting di parametri abbiamo ottenuto il layout della linea di scansione 24, proposto a pagina successiva (**Fig. 4.10**)

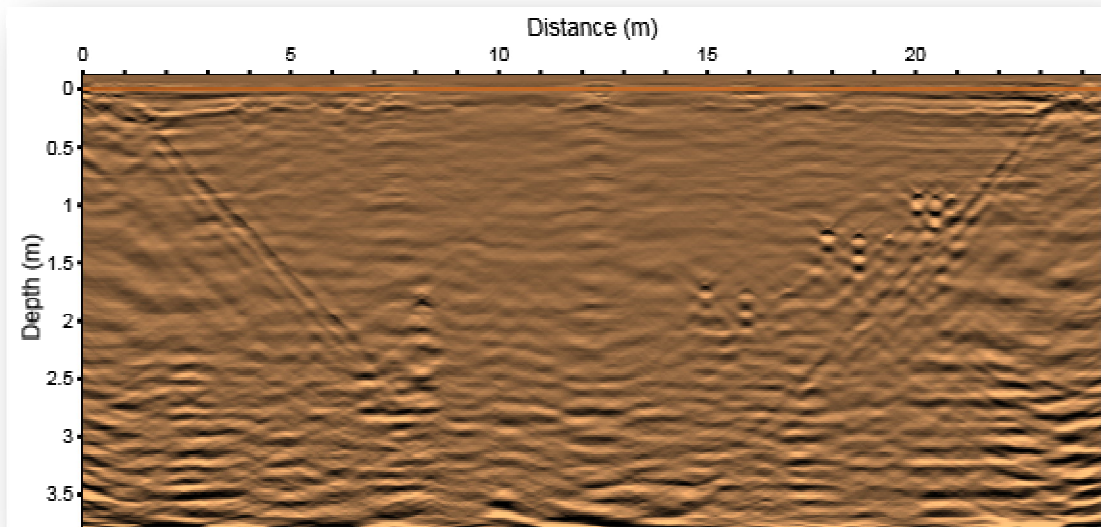


Figura 4.10 - Operazione di "migrazione" sulla linea di scansione 24 (zona 4)

Osservando la figura 4.10 possiamo concludere che si ottiene una buona ricostruzione della forma dei tubi in PVC riempiti acqua ma il diametro ricostruito (circa 20 cm) risulta essere maggiore rispetto alle dimensioni originali del tubo (diametro 10 cm); si evidenzia inoltre, per quanto concerne i tubi in PVC senz'acqua, una non perfetta ricostruzione della forma dei tubi tramite l'operazione di migrazione (si verifica il fenomeno di "sdoppiamento" del tubo) e la perdita di risoluzione del segnale con la profondità (z maggiore di 2 metri).

A riguardo dei tubi in metallo si nota una netta perdita del segnale già dopo una profondità z pari a 1 metro.

4.5 Test di penetrazione nella zona 3 – Sabbia calcarea

In questa terza zona da noi analizzata sappiamo che la profondità media dello scavo risulta essere intorno ai 3,8 metri e che la composizione è di tipo sabbioso (di origine calcarea) con un diametro caratteristico compreso tra gli 8 e gli 11 mm.

Considerando le informazioni suggerite dai report eseguiti durante le rilevazioni, abbiamo impostato sul programma "3D Radar Examiner" la costante dielettrica ϵ a un valore pari a 7.

Impostando poi un guadagno sferico SEC con costante di attenuazione pari a 0.05, per cercare di ottenere un'immagine con la migliore risoluzione possibile, e applicando un filtro BGR (Passa Alto) abbiamo ottenuto il layout della linea di scansione 15 (**Fig. 4.11**).

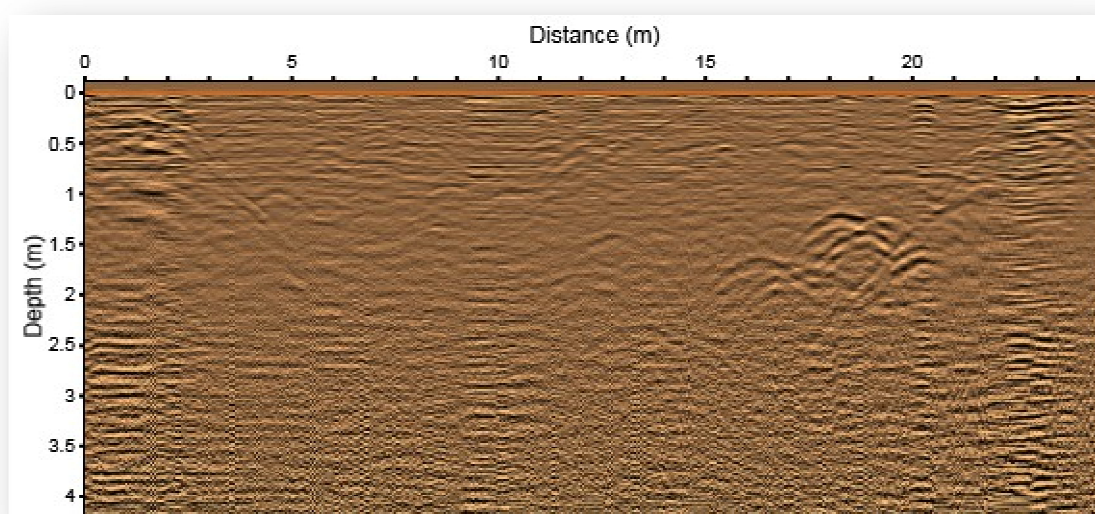


Figura 4.11 - Test di penetrazione sulla linea di scansione 15 (zona 3)

Da questa immagine possiamo dedurre che si ha una penetrazione non ottimale del segnale già nel primo layer di spessore di profondità z pari a 2,0 metri; questa perdita di segnale è causata dall'attenuazione provocata dal materiale di origine calcareo. Il forte decadimento del segnale con la profondità implica anche una scadente visualizzazione dei fianchi dello scavo.

4.6 Test di identificazione dei tubi a piccolo diametro nella zona 3

Come per il test di penetrazione, abbiamo impostato il valore della costante dielettrica ϵ al valore 7 ed eseguito l'elaborazione dopo aver aggiunto un guadagno sferico SEC e un filtro BGR (Passa Alto). Come possiamo notare dalla sezione sotto (**Fig. 4.12**) le 3 serie di tubi si ripropongono come nello schema proposto nelle zone precedenti ma si trovano a 3 profondità diverse:

- ✓ Primo stendimento a $z = 1,20$ metri;
- ✓ Secondo stendimento a $z = 1,70$ metri;
- ✓ Terzo stendimento a $z = 2,40$ metri;

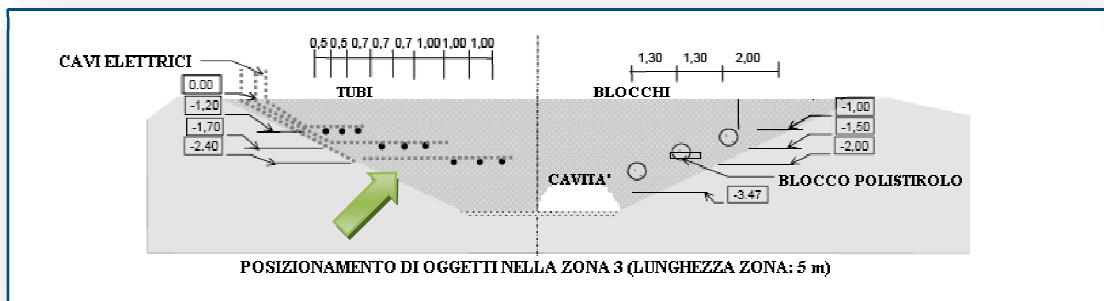


Figura 4.12 - Sezione della zona 3

Nella figura presentata a pagina successiva (**Fig. 4.13**) viene presentato il layout della linea di scansione 15.

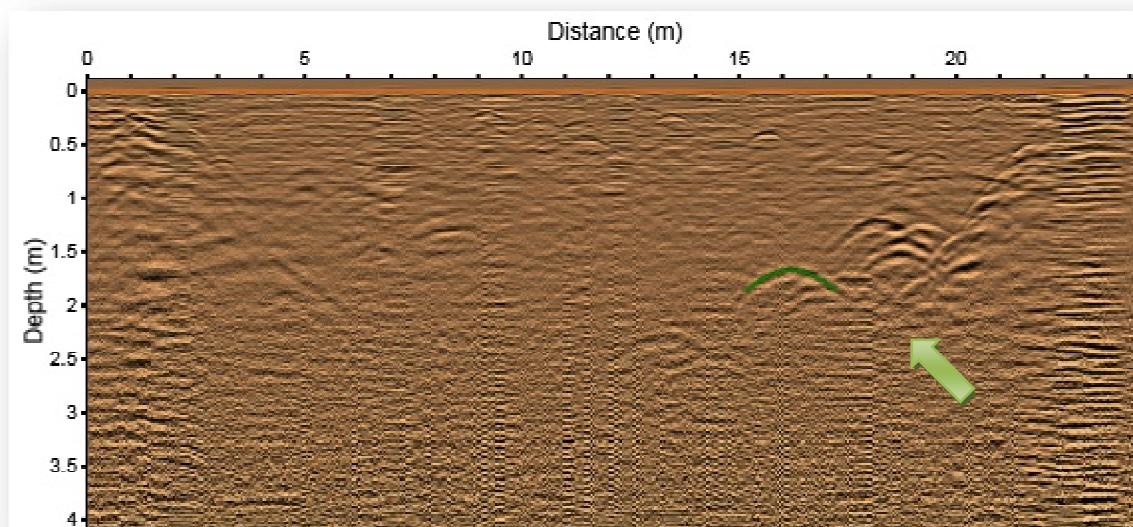


Figura 4.13 - Test di identificazione dei tubi a piccolo diametro sulla linea di scansione 15 (zona 4)

Osservando la figura 4.13 possiamo concludere che, con questa tipologia di elaborazione, riusciamo a individuare correttamente le profondità alla quale si trovano le 3 serie di tubi (anche se le iperboli di riflessione risultano essere molto deboli e a bassa risoluzione).

Questa scarsa risoluzione delle iperboli di riflessione si riscontra negli stendimenti di tubi presenti rispettivamente a una profondità z pari a 1,20 metri e a z pari a 1,70 metri. Per quanto riguarda invece la serie di tubi presente a una profondità z pari a 2,40 metri si ha la perdita quasi totale del segnale.

Dopo aver concluso questo test abbiamo effettuato l'operazione di migrazione, come avvenuto nelle zone precedenti, impostando la costante dielettrica ϵ ad un valore pari a 7, l'half angle ad un valore di 60° e il max radius ad un valore di 1,3 metri (**Fig. 4.14**).

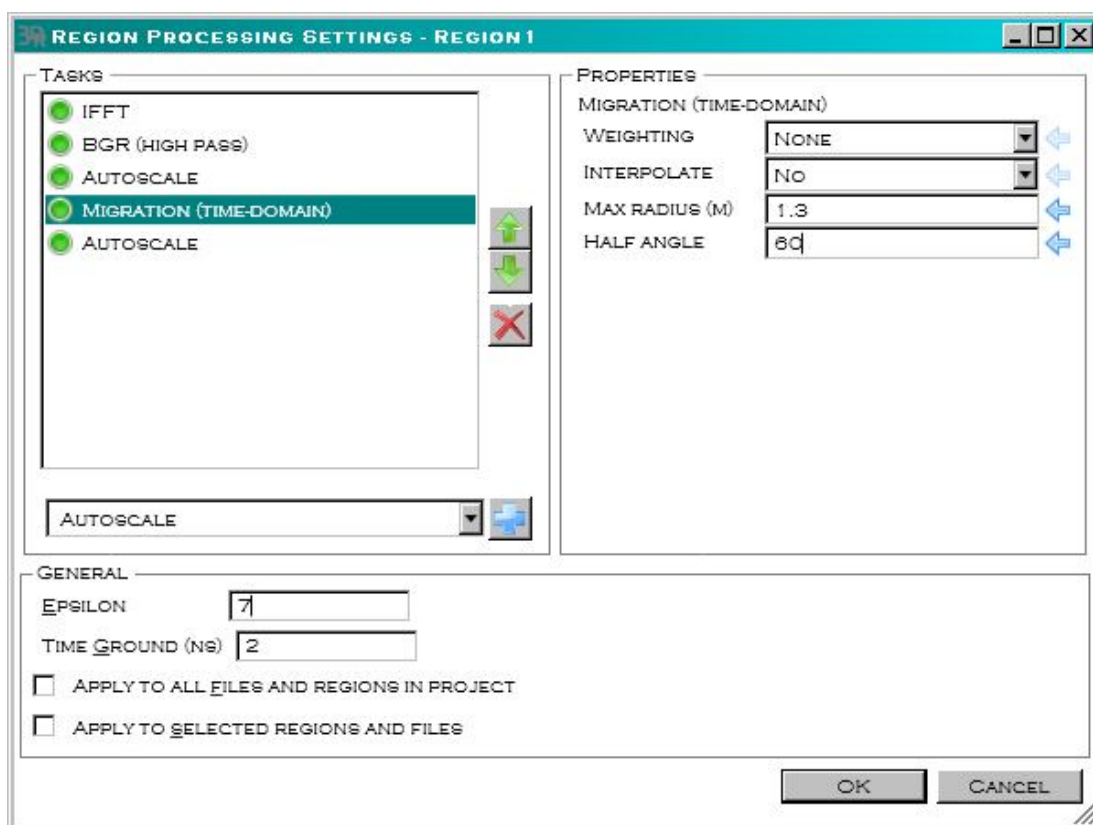


Figura 4.14 - Schermata del programma 3D Radar Examiner per impostare i parametri necessari ad effettuare l'operazione di "migrazione" nella zona 3

Dopo aver effettuato l'elaborazione con il seguente setting di parametri abbiamo ottenuto il layout della linea di scansione 15, proposto a pagina successiva (**Fig. 4.15**)

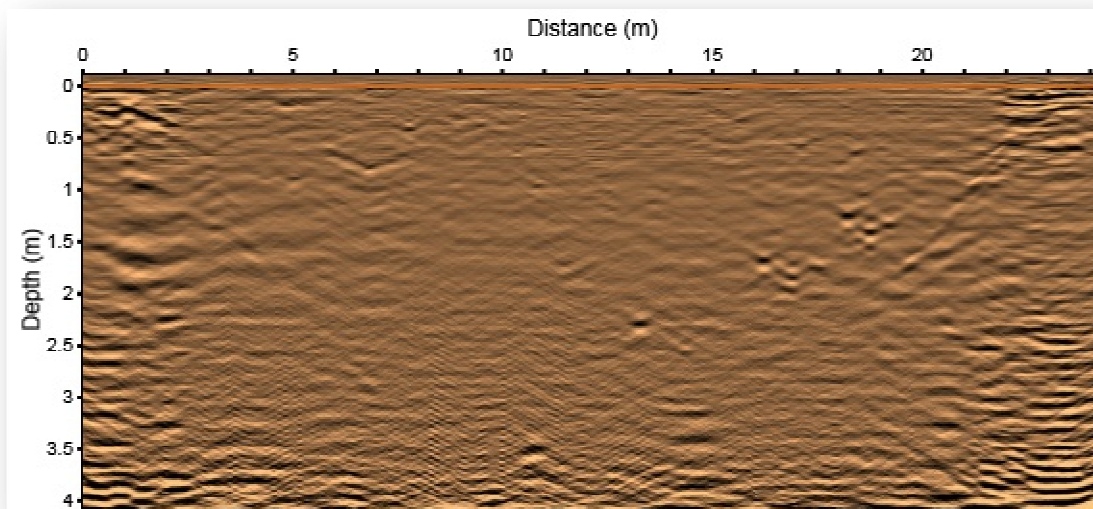


Figura 4.15 - Operazione di "migrazione" sulla linea di scansione 15 (zona 3)

Osservando la figura 4.15 possiamo concludere che si ottiene una buona ricostruzione della forma dei tubi in PVC riempiti acqua ma il diametro ricostruito (circa 25 cm) risulta essere maggiore rispetto alle dimensioni originali del tubo (diametro 10 cm); si evidenzia inoltre, per quanto concerne i tubi in PVC senz'acqua e per quelli in metallo, una non perfetta ricostruzione della forma dei tubi tramite l'operazione di migrazione (si verifica il fenomeno di "sdoppiamento" del tubo) e la perdita di risoluzione del segnale con la profondità (z maggiore di 2 metri).

A riguardo dei tubi in PVC senza acqua e dei tubi in metallo si nota una perdita completa del segnale con la profondità (z pari a 2,40 metri).

4.7 Test di penetrazione nella zona 2 - Multistrato

In questa quarta zona è possibile eseguire solamente il suddetto test perché non sono presenti tubazioni interrato da poter rilevare. Tuttavia questa zona risulta essere molto interessante da analizzare poiché, essendo composta da 5 differenti tipologie di terreno, permette di capire come una composizione di terreno

eterogenea, caratteristica spesso riscontrata in ambiente urbano, possa influenzare o meno il passaggio del segnale radar in profondità.

In questa zona la profondità media dello scavo risulta essere intorno ai 3,6 metri; la stratigrafia di questa zona viene riportata nella figura (Fig. 4.16) e nella tabella sottostante (Tab. 4.1)



Figura 4.16 - Sezione della zona 2

Tipologia strato	Spessore [m]
Sabbia calcarea d'Arthon	0,80
Ghiaia 0/20	0,60
Ghiaia 14/20	0,60
Sabbia calcarea d'Arthon	1,30
Limo	0,60

Tabella 4.1 - Tipologia degli strati e spessori relativi dei materiali presenti nella zona 2 degli strati

Considerando che in questa zona sono presenti 5 tipologie differenti di terreno abbiamo deciso di impostare sul programma "3D Radar Examiner" la costante dielettrica ϵ a un valore medio pari a 5 (suggerito di default dal programma stesso). Impostando poi un guadagno sferico SEC con costante di attenuazione pari a 0.05, per cercare di ottenere un'immagine con la migliore risoluzione possibile, e applicando un filtro BGR (Passa Alto) abbiamo ottenuto il layout della linea di scansione 11 (**Fig. 4.17**).

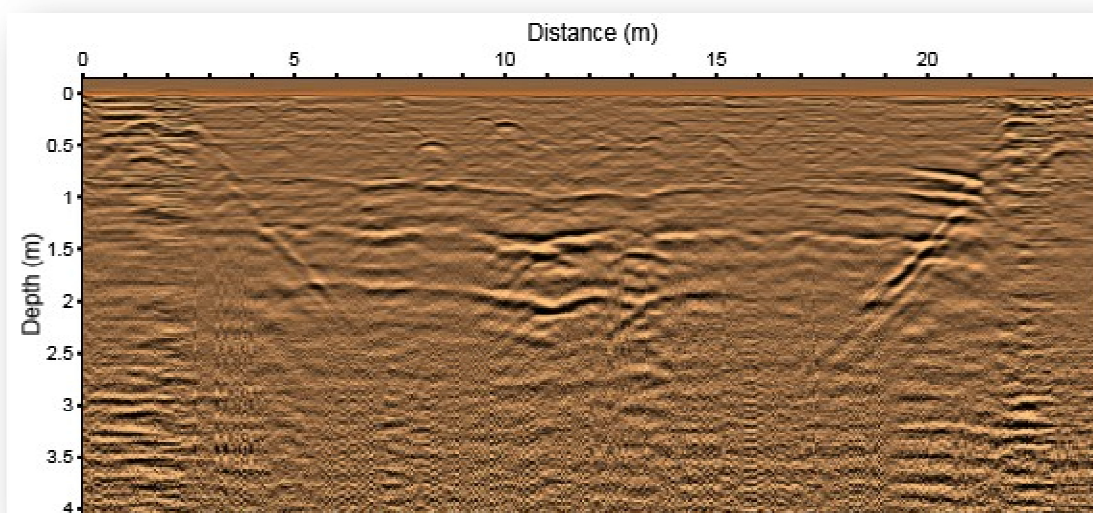


Figura 4.17 - Test di penetrazione sulla linea di scansione 11 (zona 2)

Da questa immagine possiamo concludere che il segnale ha una buona penetrazione fino a una profondità z pari a 2,8 metri e che è possibile identificare correttamente i primi 3 strati della zona caratterizzati da una composizione sabbiosa e ghiaiosa. Infatti il segnale non riesce a "passare" oltre questa soglia e non si riesce a identificare l'interfaccia che divide la sabbia calcarea dallo strato limoso.

Questa peculiarità si riscontra anche durante l'individuazione dei fianchi dello scavo: essi infatti sono facilmente individuabili fino ad una profondità z pari a 2,8 metri per poi scomparire subito dopo all'aumentare della profondità oltre questa profondità "soglia".

4.8 Test di penetrazione nella zona 1 - Limo

In questa quinta e ultima zona da noi analizzata sappiamo che la profondità media dello scavo risulta essere intorno ai 3,5 metri e che la composizione è di tipo limoso con un diametro caratteristico che per il 98 % dei casi risulta essere inferiore a 80 micron e che nel 100 % dei casi risulta essere inferiore a 2 mm

Considerando le informazioni suggerite dai report eseguiti durante le rilevazioni, abbiamo impostato sul programma "3D Radar Examiner" la costante dielettrica ϵ a un valore pari a 8,5.

Impostando poi un guadagno sferico SEC con costante di attenuazione pari a 0.05, per cercare di ottenere un'immagine con la migliore risoluzione possibile, e applicando un filtro BGR (Passa Alto) abbiamo ottenuto il layout della linea di scansione 5 (**Fig. 4.18**).

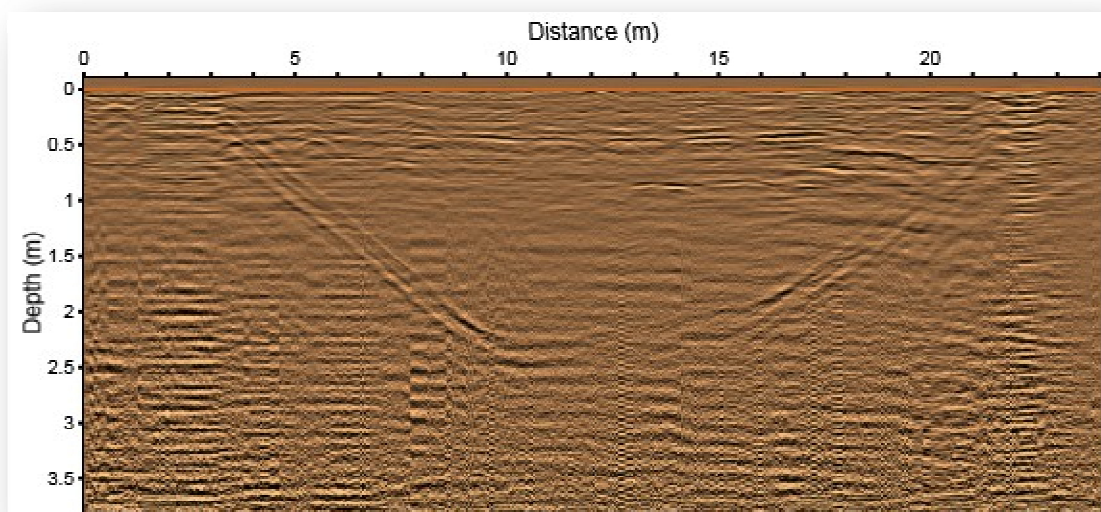


Figura 4.18 - Test di penetrazione sulla linea di scansione 5 – zona 1

Da questa immagine possiamo dedurre che con questo materiale si ha una penetrazione discreta fino a una profondità z pari a 2,5 metri e che la perdita del

segnale in profondità è causata dall'elevata capacità di attenuazione che contraddistingue i terreni particolarmente sciolti come il limo; inoltre è possibile identificare i fianchi dello scavo fino a una profondità di circa 2,5 metri.

4.9 Test di identificazione dei tubi a piccolo diametro nella zona 1

Come per il test di penetrazione, abbiamo impostato il valore della costante dielettrica ϵ al valore di 8,5 ed eseguito l'elaborazione dopo aver aggiunto un guadagno sferico SEC e un filtro BGR (Passa Alto). Come possiamo notare dalla sezione posta a pagina successiva (**Fig. 4.19**) le 3 serie di tubi si ripropongono come nello schema proposto nelle zone precedenti ma si trovano a 3 profondità diverse:

- ✓ Primo stendimento a $z = 0,80$ metri;
- ✓ Secondo stendimento a $z = 1,20$ metri;
- ✓ Terzo stendimento a $z = 1,83$ metri;

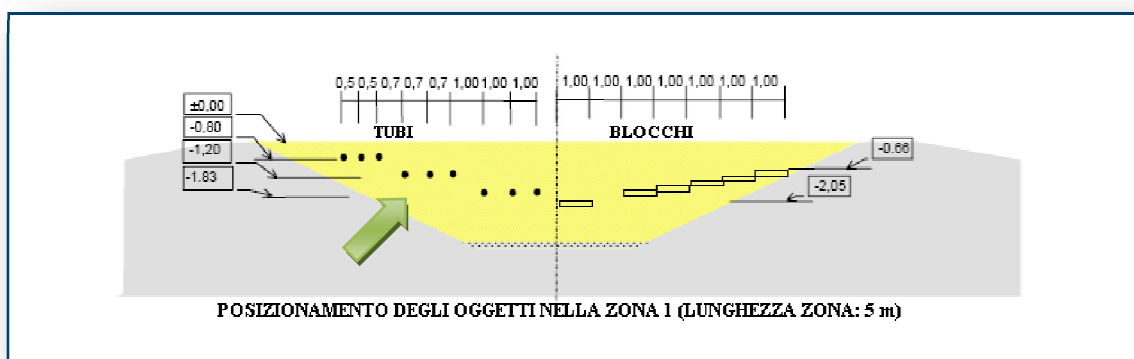


Figura 4.19 - Sezione della zona 3

Nella figura presentata di seguito (**Fig. 4.20**) viene presentato il layout della linea di scansione 9 la quale, a dispetto della linea di scansione 5 analizzata in precedenza, prevede al suo interno la presenza dei tubi.

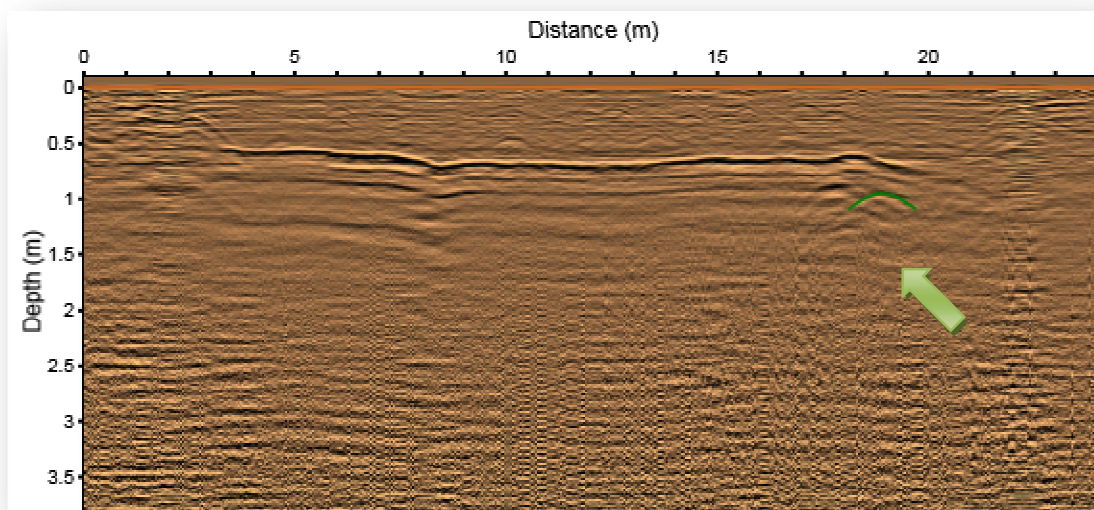


Figura 4.20 - Test di identificazione dei tubi a piccolo diametro sulla linea di scansione 9 (zona 1)

Osservando la figura 4.20 possiamo notare immediatamente che il segnale viene bloccato già nel primo metro di profondità. Infatti l'immagine non risulta disturbata fino a una profondità z pari a 0,5 metri; successivamente viene individuata un'interfaccia che non permette il passaggio del segnale; proprio per questo motivo il segnale non riesce a raggiungere la zona dove sono posti gli stendimenti di tubi. Come è facile intuire l'assorbimento di segnale provocato dalla presenza dell'interfaccia comporta l'impossibilità di creare le iperboli di riflessioni e, di conseguenza, risulta impossibile ricostruire la forma dei tubi tramite l'operazione di "migrazione".

CAPITOLO 5

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

Come abbiamo potuto vedere dai layout proposti nel capitolo precedente, il sistema GeoScope TM è riuscito a ottenere degli ottimi risultati sia nel test di penetrazione che in quello di identificazione dei tubi sottili per quanto concerne i materiali ghiaiosi.

Infatti sono state generate, alle profondità corrette e con una buona risoluzione, le iperboli di riflessione relative alle varie tubazioni poste nel sito di Nantes; inoltre, per quanto concerne la ghiaia con diametro caratteristico 14/20 si è riuscito a individuare il fondo dello scavo posto a una profondità z pari a 4,3 metri.

La possibilità di individuare anche in profondità layer e oggetti di misura abbastanza rilevante è una caratteristica peculiare dei sistemi radar "Step-Frequency": infatti, tramite l'utilizzo di questa strumentazione, si ha la possibilità di avere ed elaborare una banda molto ampia di segnale (compresa tra i 100 e i 3000 MHz). Ciò comporta che il segnale riesce a ritornare in superficie verso l'antenna con un'ottima risoluzione, permettendo di individuare correttamente targets di discreta entità e di avere una buona penetrazione del segnale in profondità.

Per quanto concerne invece l'investigazione in materiali sciolti, come per esempio il limo, abbiamo ottenuto dei risultati scadenti perché il segnale non riesce a

penetrare fino a una profondità utile per poter rilevare la presenza dei tubi; questo fattore è causato dalla forte attenuazione del segnale provocata dai materiali sciolti. Di difficile interpretazione invece risultano essere i risultati ottenuti nella sabbia calcarea: infatti le sabbie, in genere, sono un "buon" materiale per le indagini geofisiche elettromagnetiche mentre, nel nostro caso, il segnale risulta essere molto debole e non si riescono a individuare con precisione le iperboli di riflessione generate dai tubi. Questa problematica è sicuramente in parte attribuibile all'attenuazione provocata dalla componente calcarea della sabbia, anche se la causa principale della difficile individuazione dei tubi a piccolo diametro è in gran parte dovuta alla polarizzazione verticale dell'antenna (asse dei dipoli perpendicolare alla direzione dei tubi). E' da sottolineare, inoltre, che questa difficoltà è stata riscontrata anche negli altri materiali soprattutto per quanto concerne i tubi in acciaio presenti nel sito .

La spiegazione di questo problema è rappresentata nella figura proposta a pagina successiva (**Fig. 5.1**), nella quale vediamo come varia la capacità di scattering dei tubi in metallo rispetto al raggio e alla lunghezza d'onda del segnale.

In questo grafico è evidente come la linea rossa (SWTE), paragonabile a una polarizzazione verticale, risulta avere sempre una capacità di scattering inferiore rispetto alla linea blu (SWTM), la quale rappresenta invece una polarizzazione orizzontale.

Questa peculiarità risulta essere molto chiara soprattutto nel primo tratto del grafico, cioè quando il rapporto tra il raggio del tubo e la lunghezza d'onda del segnale è inferiore a 6 (condizione nella quale ci troviamo noi).

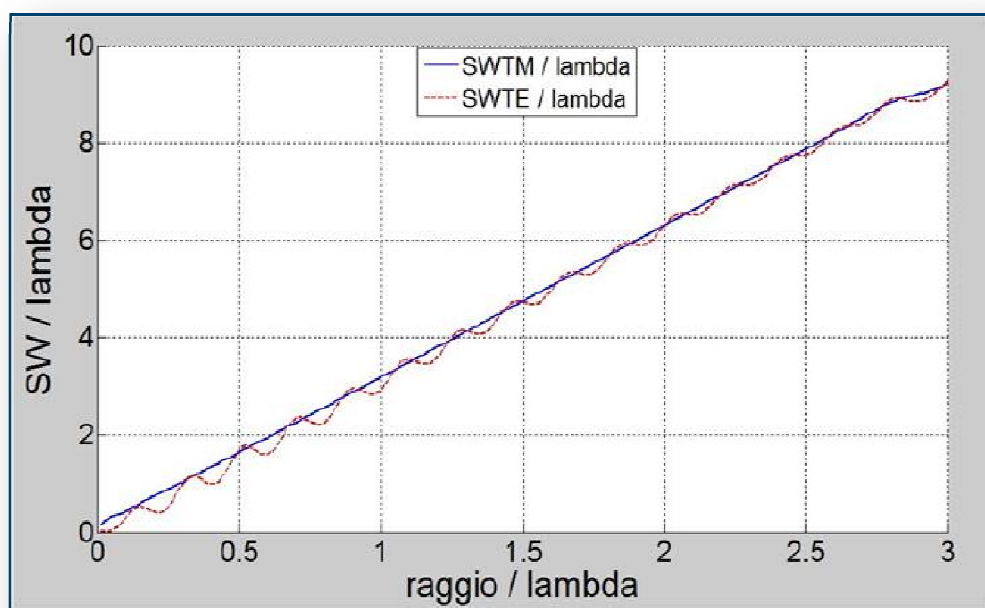


Figura 5.1 - Capacità di scattering dei tubi in metallo rispetto al rapporto tra il raggio dei tubi in metallo e alla lunghezza d'onda

Un ulteriore fattore che siamo andati ad analizzare in questo lavoro di tesi riguarda l'efficienza dell'antenna air-lunched. Come già spiegato in precedenza, questa tipologia di antenna permette di individuare anche in profondità layer e oggetti di misura abbastanza rilevante grazie alla possibilità di generare e inviare un segnale con una banda continua e molto ampia (compresa tra i 100 e i 3000 MHz).

Inoltre quest'antenna, avendo un'elevazione dal terreno che può raggiungere i 50 cm, permette di effettuare rilevazioni radar anche su terreni particolarmente accidentati.

Dobbiamo sottolineare, però, che l'utilizzo di questa antenna "air-lunched" comporta una forte riflessione del segnale dovuta al passaggio attraverso l'interfaccia aria/terreno (**Fig. 5.2**): infatti i coefficienti di riflessione di questi 2 "mezzi" sono molto differenti e questa differenza comporta un forte disturbo al segnale inviato dalla strumentazione GeoScope TM.

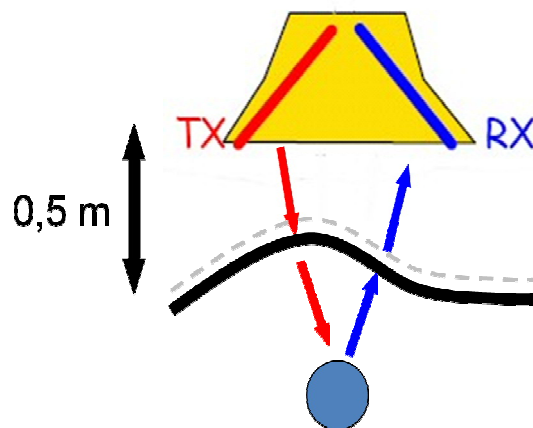


Figura 5.2 – Deviazione del segnale dovuta dalla riflessione indotta dal passaggio attraverso l'interfaccia aria/terreno

Vengono proposti in questa parte conclusiva del capitolo alcuni sviluppi futuri a questo lavoro che possono essere molto utili per poter effettuare una valutazione più accurata e completa riguardo a questa particolare tecnologia GPR:

- 1) Scansione del sito con una geometria di acquisizione perpendicolare a quella eseguita in questo elaborato; questa configurazione risulterebbe essere ottimale per i motivi di polarizzazione spiegati precedentemente in questo capitolo.
- 2) Confronto in parallelo con i dati rilevati sulla stessa area da un tradizionale sistema GPR 3D ad antenna "ground-coupled" per individuare le potenzialità e i difetti di entrambe le tecnologie.
- 3) Scansione del sito con la strumentazione GeoScope TM eseguita sia in condizione di terreno asciutto (come nel nostro caso) che in condizione di lama d'acqua presente sul terreno (condizioni bagnate). La presenza di acqua, infatti, recherebbe un disturbo al segnale, a causa della riflessione generata dalla lama d'acqua, e provocherebbe un'ulteriore attenuazione del segnale qualora ci fosse infiltrazione nel terreno (come riportato nella Tabella 1.1 presentata nel Capitolo 1).

Riferimenti bibliografici e sitologia

- [1] Oz Yilmaz, "Seismic data analysis. Volume 1 : processing, inversion, and interpretation of seismic data", Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, USA, 2001.
- [2] Oz Yilmaz, "Seismic data analysis. Volume 1 : processing, inversion, and interpretation of seismic data", Society of Exploration Geophysicists, Tulsa, USA, 2001.
- [3] Jeffrey J. Daniels, "Ground Penetrating Fundamentals", Novembre 2000
- [4] Lualdi M., Marchesini P., "Indagini Geognostiche per la mappatura dei sottoservizi", Regione Lombardia, Laboratorio Sottosuolo, Sottosopra, n. 4, 12-15, 2007
www.ors.regione.lombardia.it/OSIEG/AreaServiziRete/contenuti_informativi/contenuto_informativo_Rete.shtml?1675
- [5] Zanzi L., "Appunti di sismica di esplorazione e georadar", Ed. CUSL, 2010
- [6] J.L. Chazelas, "Création d'un site-test pour les methods géophysiques appliqués aux travaux sans tranchée", Laboratoire Central des Pontes et Chaussées – Centre de Nantes, Febbraio 1998

[7] <http://www.3d-radar.com/wp-content/uploads/2010/04/3dr-v-series-a4.pdf>

[8] <http://www.3d-radar.com/3d-software/3dr-examiner>

[9] <http://www.3d-radar.com/military/technology-2>

[10] <http://www.3d-radar.com/military/3d-radar-principle-of-operation>
