

METODOLOGIA GPR (GROUND PROBING RADAR).

Negli ultimi anni la metodologia GPR (Ground Probing Radar) è stata applicata con sempre maggiore successo nell'ambito dei controlli non distruttivi grazie alla velocità esecutiva ed all'elevato potere risolutivo.

Di sicura efficacia è la possibilità di variare la definizione e la penetrazione in profondità all'interno del mezzo indagato cambiando i soli trasduttori (antenne), mantenendo invariate le modalità di acquisizione.

L'utilizzo di trasduttori ad altissima frequenza, 900-1500 Mhz, consente la risoluzione di target di pochi cm di spessore nell'ambito del primo metro di mezzo indagato.

L'utilizzo invece di antenne a bassa frequenza, 80-100 Mhz, dotate di una elevata potenza di trasmissione, consente il raggiungimento di profondità superiori a 10 m; in tal caso però, la lunghezza d'onda del segnale permette di ottenere una risoluzione di target di qualche decimetro di spessore.

Esiste infine la possibilità di impiego di una vasta gamma di trasduttori a frequenze intermedie scelte in base allo scopo dell'indagine e che garantiscono il miglior rapporto risoluzione/penetrazione del segnale.

Cenni teorici

I principi teorici del GPR sono basati sull'analisi delle modalità di propagazione di segnali elettromagnetici all'interno dei materiali indagati.

Un impulso elettromagnetico a radio frequenza viene trasmesso da un antenna radar.

Una parte dell'energia viene riflessa in corrispondenza delle interfacce elettromagnetiche presenti all'interno del materiale, mentre la parte restante continua il cammino in profondità.

L'energia riflessa viene quindi captata dalla sezione ricevente dell'antenna radar.

Questa sequenza di trasmissioni e ricezioni di impulsi viene ripetuta in successione mentre l'antenna è in movimento lungo un allineamento prefissato.

Il segnale ricevuto è costituito da uno scan che misura il tempo intercorso tra la trasmissione e la ricezione di un segnale e l'ampiezza del segnale ricevuto.

La rappresentazione in sequenza di ogni scan tramite un diagramma spazio/tempo produce un profilo continuo relativo alla sezione elettro-stratigrafica del mezzo indagato.

Le relazioni tra le caratteristiche elettriche dei materiali come costante dielettrica, resistività, etc. e la propagazione dei segnali elettromagnetici al loro interno sono complesse.

In generale si può affermare che costante dielettrica e suscettibilità magnetica sono in relazione con velocità di propagazione e riflettività dei segnali mentre la resistività influisce sull'attenuazione.

Ai fini di una corretta interpretazione vengono quindi utilizzate le seguenti relazioni:

velocità di propagazione	$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$
Profondità dei riflettori	$s = \frac{v \cdot t}{2}$
Coefficiente di riflessione	$K = \frac{(\sqrt{\epsilon_2} - \sqrt{\epsilon_1})}{(\sqrt{\epsilon_2} + \sqrt{\epsilon_1})}$
Coefficiente di penetrazione	$R = 1 - K$
Attenuazione	$A = \frac{1365 \cdot \sigma}{\sqrt{\epsilon}}$
Lunghezza d'onda	$\lambda = \frac{v}{f}$

dove:

c = velocità nel vuoto (0.3 m/nS)	ϵ = costante dielettrica
t = tempo di propagazione (nS)	A = Attenuazione (dB)
σ = Conduttività (S/m)	f = frequenza (MHz)

La lunghezza d'onda determina la capacità di risoluzione di livelli sottili. Nei sondaggi GPR lo spessore minimo risolvibile è pari 1,5 della lunghezza d'onda.

In caso i livelli intermedi abbiano spessore inferiore a tale valore, le riflessioni delle interfacce cambieranno in fase ed in frequenza e la loro ampiezza potrebbe essere attenuata da mutui effetti.

Processing e interpretazione dei dati.

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

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

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

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

In caso quindi di indagini finalizzate all'individuazione di target di piccole dimensioni, i dati verranno filtrati in modo da rimuovere le riflessioni a profondità costante evidenziando principalmente le variazioni laterali del segnale.

Una volta ottenuta la sezione radar-stratigrafica relativa ad ogni profilo, viene effettuata la sua conversione dalla scala verticale in base tempi alla scala in profondità.

Quest'ultima fase richiede la stima della velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche che può essere effettuata utilizzando dati bibliografici relativi ai materiali investigati, tramite misure CDP (Common Depth Point) basate sull'analisi di riflessioni di livelli posti a profondità costante o, infine, tramite misure empiriche su target posti a profondità note.

La scelta del metodo è generalmente basata sul tipo di indagine e sulla disponibilità di informazioni relative all'area investigata.

Metodologia Time Slices

Le modalità di interpretazione classiche prevedono la ricostruzione delle sezioni radar-stratigrafiche di ogni profilo acquisito, la correlazione fra le anomalie ubicate su profili adiacenti è quindi basata sulla coincidenza di un target su più profili e sull'esperienza dell'operatore.

Al fine sia di ottimizzare la fase interpretativa sia di ottenere una di maggiore leggibilità dei risultati, è stato sviluppato un software di elaborazione simultanea di tutti i profili acquisiti sull'area di indagine.

Tale metodologia di elaborazione, denominata *Time Slices*, fornisce un'elevata definizione delle anomalie a principale sviluppo orizzontale attraverso la costruzione di sezioni parallele alla superficie di indagine ubicate a profondità crescenti. I principali vantaggi offerti da questo tipo di elaborazione sono riassumibili in una affidabile correlazione delle anomalie presenti su profili adiacenti e una precisa definizione della loro estensione sia orizzontale che verticale.

Strumentazione

La strumentazione base è un'apparecchiatura digitale SIR System 2 della GSSI (Geophysical Survey System Inc.) di North Salem U.S.A., costituita da un'unità centrale all'interno della quale viene generato il segnale inviato alla sezione trasmittente e viene elaborato il segnale ricevuto dalla sezione ricevente dell'antenna.

Un display LCD consente tutte le operazioni di calibrazione del sistema e l'impostazione dei parametri di acquisizione quali tempo di registrazione, guadagno e tipi di filtro da applicare ai segnali elettromagnetici.

Lo stesso display consente inoltre la visualizzazione del profilo durante l'acquisizione consentendo una rapida valutazione, già durante le operazioni di campo, della qualità dei segnali registrati.



Unità centrale SIR System 2

All'unità centrale è collegata, tramite un cavo multipolare, l'antenna che ha il compito di trasmettere i segnali elettromagnetici all'interno del sottosuolo e di ricevere le riflessioni dovute alle interfacce elettromagnetiche presenti alle diverse profondità di indagine.

La frequenza di trasmissione viene determinata dalle caratteristiche costruttive dell'antenna stessa e può variare da 14 MHz a oltre 2,5 GHz.

I dati vengono registrati su un supporto magnetico (Hard Disk) interno all'unità centrale dalla quale possono essere trasferiti in un PC per la successiva elaborazione.

Dimensioni e peso estremamente ridotti ne consentono l'utilizzo in condizioni critiche ove sia necessaria la rapidità nella movimentazione della strumentazione richiesta nel campo di intervento specifico.

Acquisizione dati in campo

Come già anticipato la scelta della frequenza del trasduttore è strettamente legata allo scopo specifico dell'indagine.

Le ricerche indirette, basate sugli effetti causati da danneggiamenti dei manufatti, hanno come obiettivo anomalie di medie dimensioni poste a profondità che possono raggiungere valori prossimi a 10 m.

La configurazione strumentale tipica è quindi costituita da:

- Trasduttore da 300 MHz
- Tempo di fondo scala superiore a 200 nS (nanosecondi)

In caso la profondità sia ridotta ad un massimo di 5 m è preferibile l'utilizzo di un trasduttore a 500 MHz con un tempo di fondo scala superiore a 100 nS.

Per le indagini dirette sui manufatti è invece richiesto un livello risolutivo molto maggiore.

La configurazione strumentale ottimale è anche in questo caso in funzione degli obiettivi dell'indagine.

Per la valutazione degli spessori:

- Trasduttore da 1500 MHz
- Tempo di fondo scala 20 nS

La valutazione delle dimensioni dei manufatti richiedendo una maggior profondità di indagine, purtroppo ottenibile a discapito della risoluzione, è caratterizzata da:

- Trasduttore da 500 MHz
- Tempo di fondo scala 75 nS

Ovviamente le configurazioni proposte rappresentano uno standard che deve essere, in ogni caso, ottimizzato tramite prove di taratura preliminari all'indagine.

Ove possibile la configurazione deve essere mantenuta costante al fine di ottenere risultati comparabili su tutta la struttura indagata.

La geometria di acquisizione dei profili varia anch'essa in funzione dei target; le indagini dirette richiedono quindi un'elevata copertura dell'area mentre le indagini indirette possono richiedere spaziature maggiori tra profili adiacenti.



Sequenze di controllo dello stato di fatto di argini

GEORADAR

CAMPI DI UTILIZZO

Applicazioni al campo geologico:

- Stratigrafia del terreno
- Contatti geologici
- Profondità del bedrock
- Individuazione di cavità carsiche
- Individuazione profondità della falda acquifera
- Mappatura fratture
- Infiltrazioni

Applicazioni all'ingegneria:

- Mappatura sottoservizi
- Verifica consolidamenti
- Localizzazione ferri d'armatura
- Controlli su Strade e rilevati, fondazioni, dighe
- Ponti e viadotti (stato di conservazione del manto bituminoso, soletta, infiltrazioni,..)
- Strati di rivestimento
- Jet grouting
- Gallerie (spessore della volta, infiltrazioni, fratture,...)
- Aeroporti (piste in c.a.)
- Murature

Applicazioni all'archeologia:

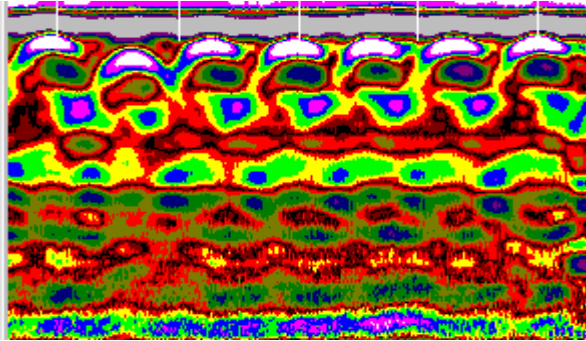
- Individuazione strutture sepolte
- Verifica stato conservazione murature

Applicazioni all'ambiente:

- Discariche
- Individuazione fughe contaminanti liquidi
- Impermeabilizzazioni

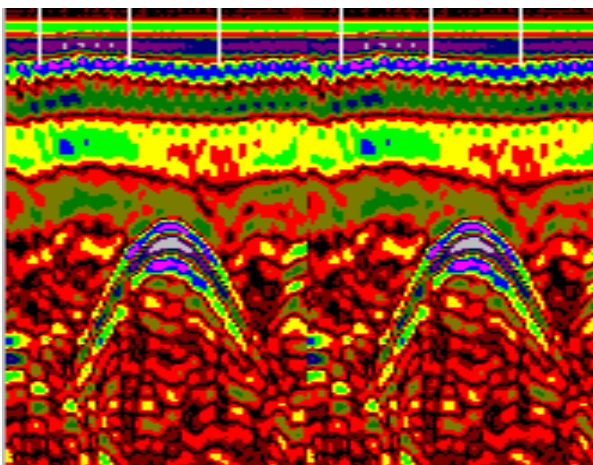
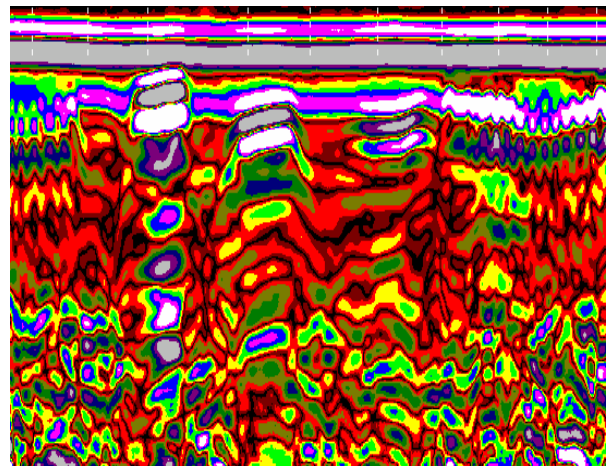
Applicazioni all'ingegneria

La ricerca dei ferri di armatura (a sinistra) e dei distacchi del paramento esterno (in basso) di pareti verticali sono operazioni di rapida esecuzione e totalmente prive di rischio di danneggiamento della superficie investigata.



La figura a sinistra presenta una errata posizione del secondo ferro da sinistra che non è allineato con i restanti.

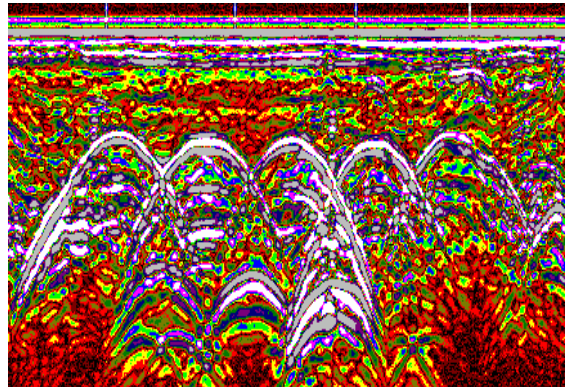
La figura a destra, acquisita su una piattaforma in cemento presenta la formazione di alcune sacche d'aria in corrispondenza della rete elettrosaldata; le forti riflessioni mascherano anche la presenza della rete.



Tubazioni, anche di piccole dimensioni, possono essere facilmente localizzate anche se coperte da reti elettrosaldate. La figura a sinistra presenta un profilo GPR a 1500 MHz.

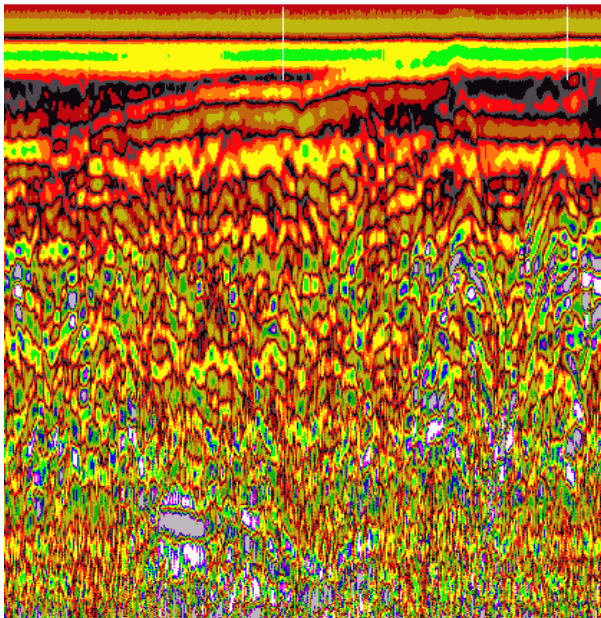
Le anomalie 'ad iperbole' sono causate da due tubature di riscaldamento interne ad una parete di un capannone industriale.

La figura a destra presenta la posizione di cinque serbatoi interrati in un'area industriale. La determinazione della posizione e della profondità rende molto più rapide le operazioni di bonifica delle aree dismesse. Le tre riflessioni 'ad iperbole' sotto i serbatoi sono dovute ad interferenze additive dei segnali.



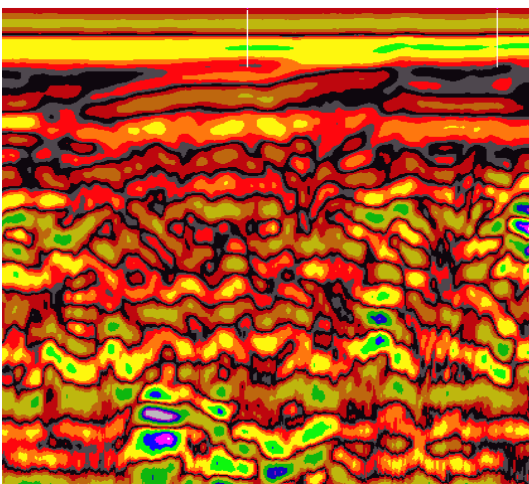
Indagini su strade

La definizione degli spessori dei diversi livelli costruttivi è oggi possibile grazie all'impiego di frequenze elevatissime. Si parte da 1 GHz fino a raggiungere i 2,5 GHz. Con queste frequenze il dettaglio del GPR raggiunge livelli fino a pochi anni fa inaspettati.



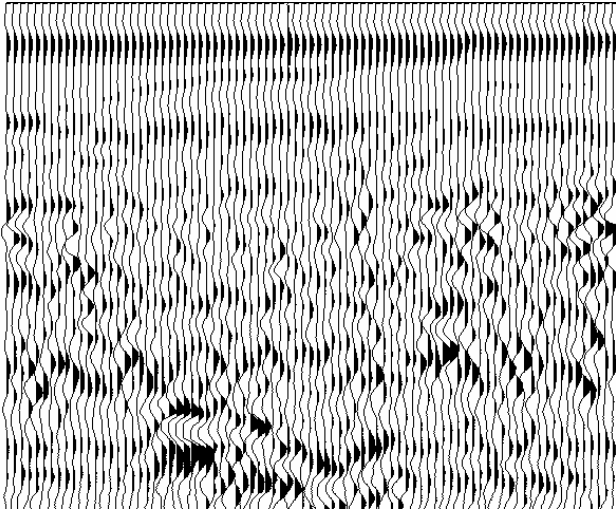
Il profilo a lato, acquisito con un'antenna da 1,5 GHz, è relativo ad un'indagine eseguita sulla pavimentazione stradale di un grande centro urbano.

I dati di campagna a frequenze così elevate risultano spesso di limitata leggibilità, è necessario quindi processare i dati in modo da mettere in risalto le informazioni utili alla definizione degli oggetti delle indagini.



Nell'esempio precedente, finalizzato alla definizione di eventuali anomalie del contatto sottofondo – pavimentazione asfaltata, l'applicazione di un filtro passa – basso ha consentito la rimozione di tutte le componenti ad alta frequenza delle riflessioni, mantenendo inalterate le informazioni utili.

La definizione delle velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche è di fondamentale importanza per l'esatta definizione degli spessori dei vari livelli costruttivi.



L'analisi eseguita su dati dell'esempio ha evidenziato velocità differenti per lo strato asfaltato, caratterizzato da una costante dielettrica $\epsilon_r = 3.3$ cui corrisponde una velocità di 16.4 cm/nS, e la parte di sottofondo, caratterizzata da una costante dielettrica $\epsilon_r = 7.8$ con una velocità di 10.7 cm/nS.

Tali valori vengono utilizzati per la conversione della sezione radar-stratigrafica, in base tempi, nella sezione stratigrafica espressa in profondità.

La visualizzazione dei dati in modalità wiggle, in cui il profilo è rappresentato da una sequenza di forme d'onda in un grafico tempo/ampiezza, è molto spesso utile per la definizione degli spessori in quanto consente di seguire con estrema facilità le fasi dei segnali relative ai singoli riflettori.

La figura sopra mostra l'esempio precedente sul quale è possibile individuare la riflessione del manto asfaltato dello spessore di 6 cm, in colore rosso, e del sottofondo, in colore verde. In colore blu viene indicata una delaminazione del sottofondo.

In basso, a circa 50 cm di profondità, è presente un sottoservizio elettrico indicato col colore giallo. Ai fini dell'indagine è comunque importante sottolineare che lo spessore del manto asfaltato rimane costante lungo tutta la sezione.

La possibilità di definire eventuali anomalie dello strato di sottofondo è di estrema utilità per una corretta gestione degli interventi di manutenzione.

Arginature.

I disturbi statici nelle opere di arginatura sono molto diffusi per una insufficiente conoscenza dei terreni impiegati e per eventuali escursioni eccessive di livello, che possono giungere fino alla tracimazione.

In tali circostanze anche il versante esterno dell'argine spesso privo di rivestimento di protezione, può subire danneggiamenti anche seri.

Gli argini che costituiscono la sponda di una corrente permanente soggetta a forti escursioni di livello rappresentano il caso di massimo impegno della stabilità degli stessi, mentre le protezioni o le arginature di alvei naturali sono solo stagionalmente soggette a condizioni di carico rischiose.

Tutte le strutture in muratura (ed anche in c.a.), subiscono le conseguenze dannose che derivano dalla natura dei terreni di appoggio e dei terreni di riempimento (cioè quelli da cui sono costituite), ma anche delle acque provenienti dall'esterno dell'arginatura che possono permeare e transitare verso l'interno del corso dell'acqua, sotto il piano di posa dell'argine.

Data la forte incidenza nelle strutture in prefabbricato di c.a. a parete delle perdite dei giunti, spesso privi di strutture 'water-stop', occorre che questi non divengano sede delle fughe d'acqua nei terreni circostanti.

Si possono distinguere due principali metodologie costruttive, argini in terra e opere in calcestruzzo armato.

Nel caso di argini in terra per rendersi conto della situazione idraulica e statica, dopo aver rilevato sperimentalmente le caratteristiche geotecniche del materiale impiegato, si può eseguire una modellizzazione della situazione reale calcolando il tempo occorrente perché con un determinato livello di piena si abbia permeazione con fuoriuscita di liquido dal paramento esterno.

Il confronto tra i dati temporali reali (la durata delle piene è in genere derivabile da dati storici) può fornire indicazioni sul rischio di cedimento delle strutture.

Per le opere in calcestruzzo armato a seconda che siano destinate a pareti, a sezioni interamente portanti, a ponti, canali o altro, presentano sempre le tipiche modalità

di disturbo statico delle opere in cls. generiche corrispondenti; lastre, pilastri, plinti di fondazione, giunti e altro.

La diagnostica, in questo caso, richiede una analisi preliminare dell'integrità delle opere che consenta la valutazione di continuità strutturale iniziale su cui sono basati i dati progettuali.

Le pareti in muratura e in calcestruzzo per canali sono strutture che essendo esposte direttamente alle variazioni climatiche, sono suscettibili di sensibile invecchiamento che favorisce, quando non la determina, una serie di disturbi statici di vario tipo.

Data la semplicità del funzionamento strutturale di questi elementi costruttivi, la diagnosi del dissesto è sempre relativamente facile.

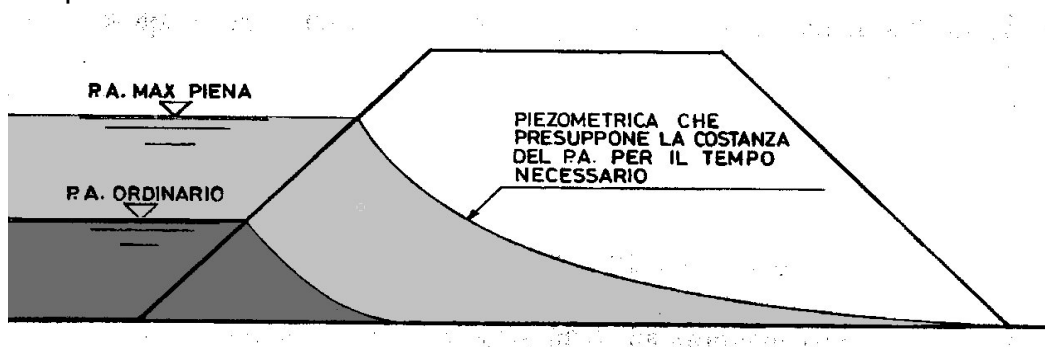
Il fatto che spesso queste opere si sviluppino in lunghezza od in estensione, richiede una specifica ricerca sulla struttura completa che consenta:

- la determinazione della tenuta dei giunti (sia come giunti o riprese di getto, che come giunti di contrazione) tra gli elementi componenti le pareti,
- la determinazione della presenza di liquido all'interno del terrapieno,
- la valutazione degli assestamenti o cedimenti sia locali che globali del terreno
- l'individuazione di eventuali ancoraggi.

Argini in terra

La valutazione delle condizioni *normali* di permeabilità è di fondamentale importanza e può essere determinata tramite indagini geofisiche.

Vista la lunghezza e l'estensione delle opere è necessario un metodo di rapida esecuzione che consenta l'investigazione completa delle stesse senza variazioni del regime di portata.

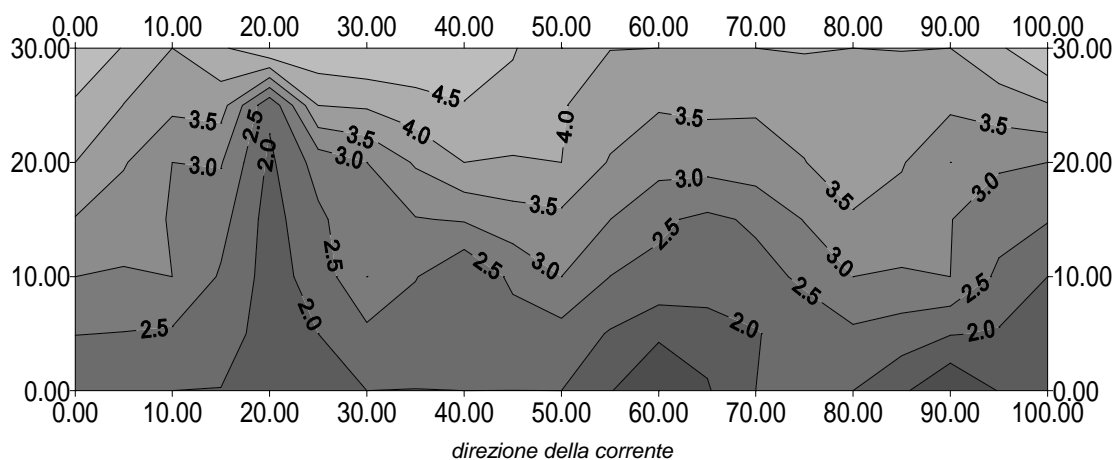


Zone di infiltrazione in differenti condizioni di portata

La definizione delle zone di infiltrazione viene eseguita con strumentazione GPR (Ground Probing Radar) tramite profili trasversali alla direzione dell'argine.

L'interdistanza tra i profili, da valutare in funzione dell'estensione della zona oggetto di indagine, deve essere tale da garantire la completa copertura dell'area.

Tale valore deve in ogni caso rimanere inferiore ad 1/10 della lunghezza dell'area stessa.



Esempio di restituzione planimetrica grafica di una indagine GPR su un argine in terra. I valori indicano la profondità dal top dell'argine della piezometrica max dell'esempio sopra riportato. A circa 20 m dall'origine è presente un 'cono', dovuto ad una carenza di materiale, sede di una maggiore infiltrazione d'acqua all'interno dell'argine.

Per quanto riguarda la frequenza del trasduttore, questa deve essere tale da consentire la precisa individuazione sul profilo dei riflettori dovuti alla frangia di infiltrazione.

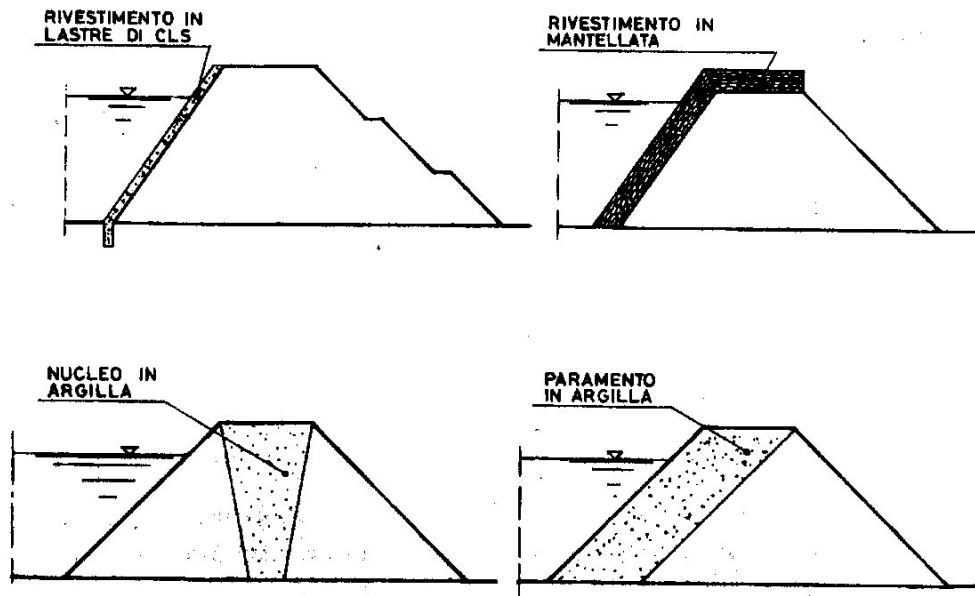
Ai fini di ottenere una più elevata risoluzione è in ogni caso da privilegiare la maggiore frequenza che consenta la definizione dei suddetti parametri.

L'elaborato grafico dei risultati fornisce uno strumento di rapida interpretazione che consente l'individuazione di zone soggette a variazioni delle caratteristiche di impermeabilizzazione del terreno dell'argine.

L'indagine consente inoltre la determinazione di zone di costipamento differenziato e/o collasso del materiale.

Opere in calcestruzzo

A differenza della tipologia costruttiva del paragrafo precedente, è necessario distinguere il manufatto in base al tipo di arginatura.



Esempi di differenti tipologie di arginature

In questo caso è necessario fare anche una distinzione sullo scopo dell'indagine.

A seconda delle necessità infatti può variare la configurazione del sistema di acquisizione.

Si possono distinguere inoltre valutazioni indirette, basate sugli effetti prodotti dalle anomalie strutturali sul materiale dell'argine, e valutazioni dirette, eseguite direttamente sui manufatti di protezione.

Nella categoria delle valutazioni indirette possono essere introdotte le seguenti tipologie di intervento:

- determinazione della tenuta dei giunti

Il problema è analogo al caso degli argini in terra, infatti vengono ricercate le zone affette da una maggiore umidità rispetto al materiale circostante.

Rispetto al caso precedente l'indagine viene focalizzata però solo nei dintorni della zona di giunzione tra gli elementi della struttura.

Una maggiore definizione è in questo caso garantita dall'esecuzione di profili con direzione longitudinale rispetto all'argine.

Il risultato grafico è basato su una restituzione planimetrica riportante le zone soggette a maggiore infiltrazione.

Anche in questo caso è necessario utilizzare trasduttori che consentano la completa investigazione dell'opera, privilegiando le frequenze maggiori ai fini di ottenere una elevata risoluzione.

Determinazione della presenza di liquido all'interno del terrapieno

Tale indagine può essere considerata un'estensione della precedente in quanto consente di individuare zone umide anche comprese tra due giunti.

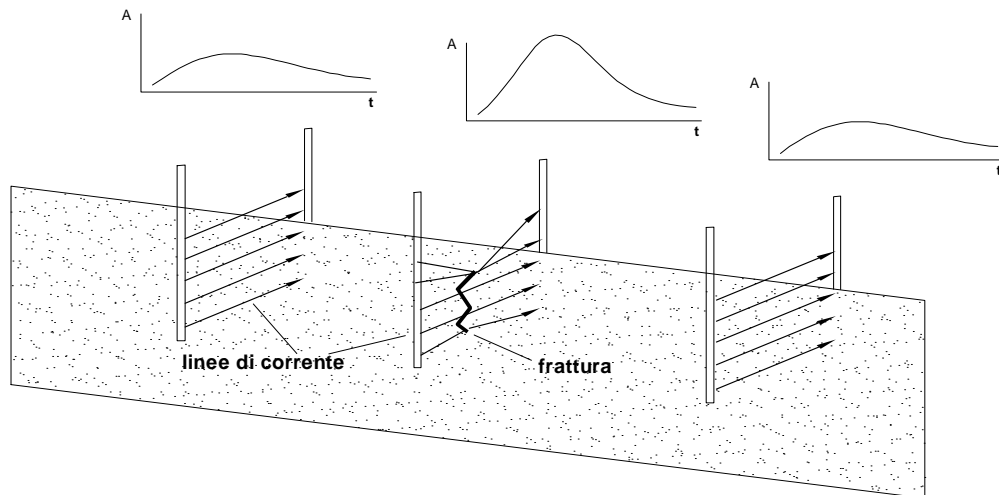
Vengono quindi rivelati eventuali cedimenti della continuità delle strutture (fessurazioni e lesioni in genere) di protezione dell'argine.

L'indagine viene condotta in modo analogo alla precedente lungo tutta la sezione di argine interessata dalle ricerche.

Il risultato grafico è, anche in questo caso, rappresentato da una planimetria indicante le zone a maggiore umidità.

I risultati vengono poi integrati da un supplemento di indagine di tipo geoelettrico che, basandosi su variazioni di flusso di corrente fra un elettrodo esterno ed uno interno alla paratia in esame, consentono la precisa individuazione di zone di infiltrazione.





Individuazione di una frattura tramite linee di corrente

Valutazione degli assestamenti o cedimenti sia locali che globali del terreno.

L'indagine viene condotta lungo un reticolo di profili a maglia adeguata agli scopi dell'indagine che interessano tutta la sezione di argine oggetto di studio.

Vengono così messe in luce eventuali strutture di cedimento del materiale dell'argine che possono determinare situazioni di instabilità.

La configurazione strumentale ideale prevede l'utilizzo di trasduttori a bassa frequenza che consentano l'investigazione fino ad una profondità almeno pari a 1,5 volte l'altezza dell'argine.

individuazione di eventuali ancoraggi.

Una serie di profili con andamento longitudinale rispetto all'argine consente l'individuazione di eventuali strutture di ancoraggio (tiranti e/o pali di fondazione, o consolidamenti Jet-grouting) posti a rinforzo delle strutture ed inglobati nell'argine stesso.

L'indagine consente di definire dimensioni longitudinali e tipologia del rinforzo. L'elaborato grafico riporta in base planimetrica la posizione delle strutture.

Nella categoria delle valutazioni dirette, ottenute da indagini sulla struttura in esame, vengono inserite tutte le indagini finalizzate alla caratterizzazione del materiale costituente il manufatto.

Valutazione delle dimensioni.

Vengono definiti parametri quali spessore, profondità e geometria costruttiva del manufatto.

La frequenza del trasduttore è di fondamentale importanza in quanto, in particolar modo nella determinazione dello spessore, è richiesto un elevato livello risolutivo.

È quindi necessario l'utilizzo di frequenze superiori al GHz, che risultano le sole in grado di garantire il livello di dettaglio richiesto.

Identificazione di zone di ammaloramento del calcestruzzo.

Alterazioni delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo., come ad esempio i vespai, vengono individuate tramite l'utilizzo di trasduttori ad elevata frequenza con un range compreso tra 500 e 1500-2500 MHz a seconda dello spessore del manufatto oggetto di indagine.

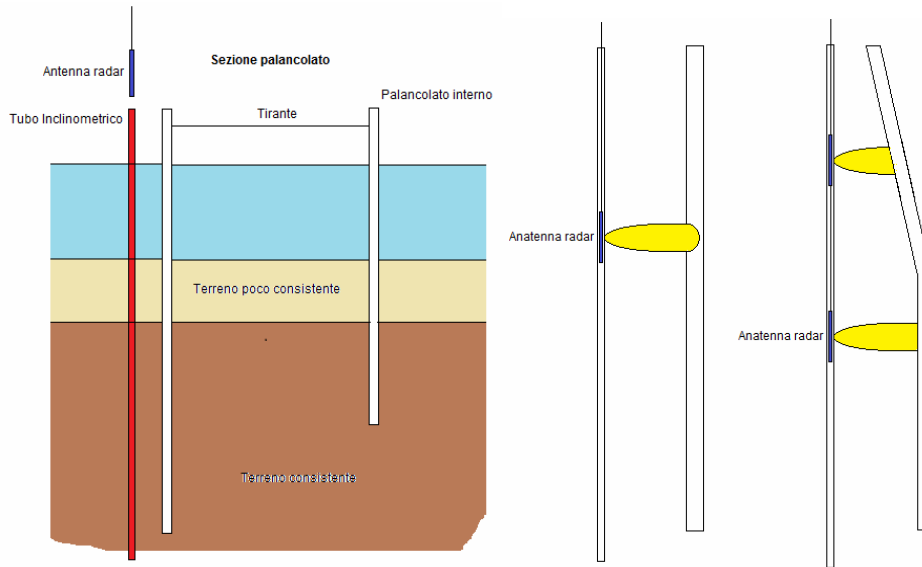
Considerato che le zone anomale presentano un elevato contrasto elettromagnetico con il materiale a contorno viene applicata la metodologia *Time Slices* che, attraverso la ricostruzione di sezioni parallele alla superficie di indagine, fornisce un elaborato completo delle condizioni del materiale a differenti profondità.



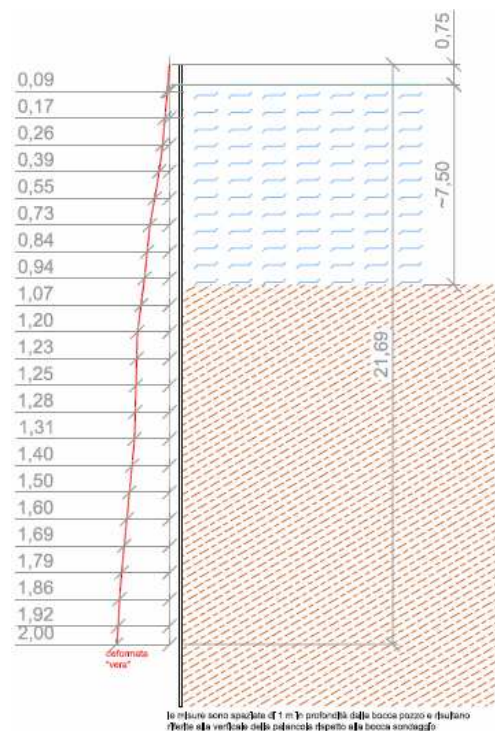
Rilievo di sottoservizi in una raffineria

Applicazione speciali

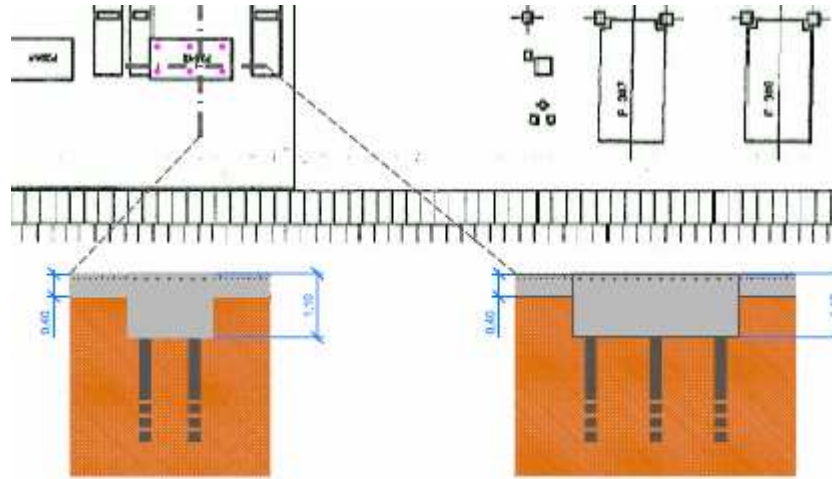
Rilievo – della verticalità di infissione di una paratia di palancole, mediante una acquisizione radar in foro



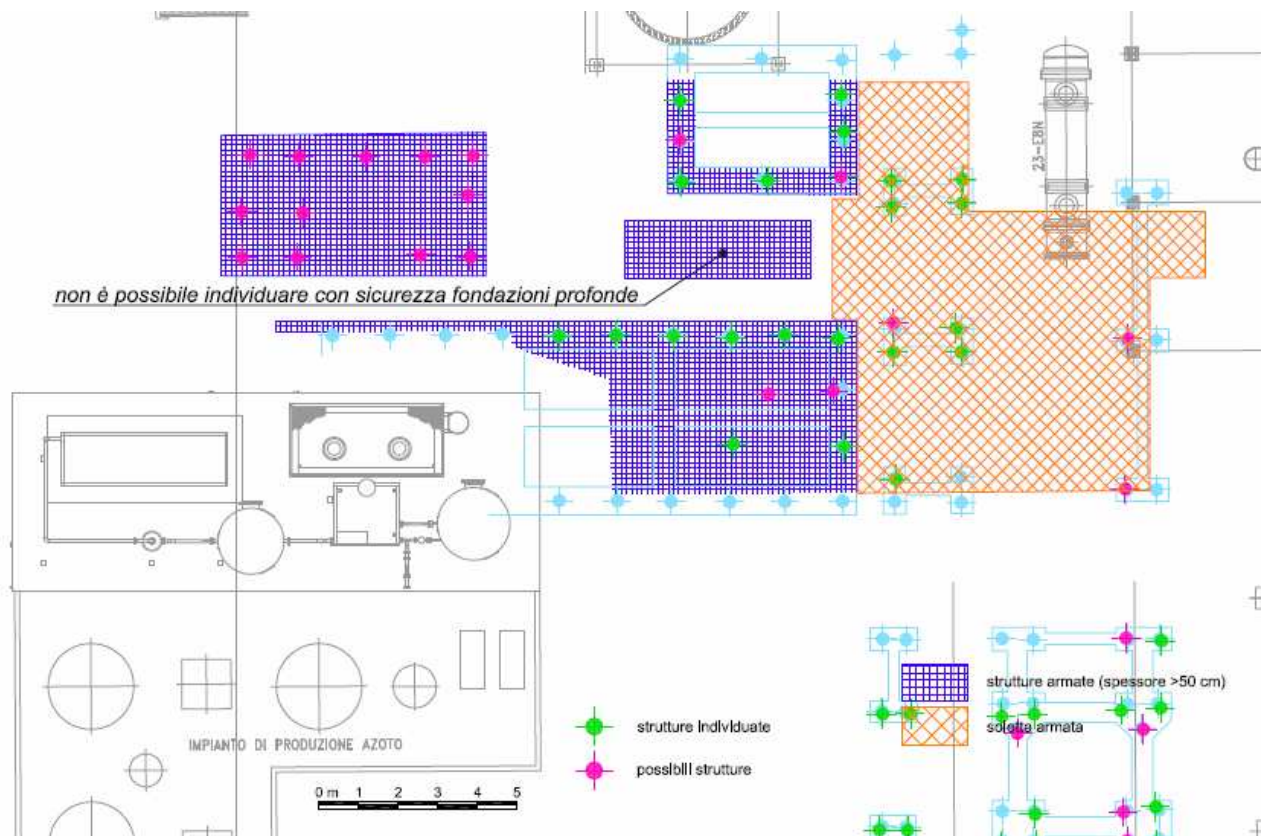
L'indagine, va eseguita inserendo l'antenna radar all'interno di un tubo inclinometrico. Il fascio delle onde radar riflettendo sul corpo della palandola fornisce informazioni riguardanti la distanza del tubo di ispezione dal bersaglio (vedi rappresentazione grafica).



Rilievo radar per l'individuazione di sottoservizi e strutture sepolte, quali fondazioni profonde, in una area industriale.



Caratterizzazione di un plinto di fondazione



Rilievo nel sottosuolo di plinti e pai di fondazione in un area industriale