

# I quaderni del consolidamento del terreno con resine espandenti

# GEOSEC



LA TOMOGRAFIA  
DELLA RESISTIVITA'  
ELETTRICA NEI  
CONSOLIDAMENTI  
CON RESINE  
ESPANDENTI

 **GEOSEC**

NUMERO

2

# LA TOMOGRAFIA DELLA RESISTIVITA' ELETTRICA NEI CONSOLIDAMENTI CON RESINE ESPANDENTI.

Federico FISCHANGER<sup>1</sup> - Marco OCCHI<sup>2</sup>

1, Geostudi Astier s.r.l., Livorno - Italy  
2, Geosec s.r.l., Parma - Italy

## 1. Presentazione

Il quaderno illustra l'utilizzo di una tecnica d'indagine non invasiva di ultima generazione, la tomografia della resistività elettrica (acronimo ERT, dall'equivalente nome inglese Electrical Resistivity Tomography), nella progettazione e nel monitoraggio in corso d'opera di un'attività di consolidamento di terreni di fondazione mediante iniezioni di resine a rapida espansione:  $T_{ie}$  (tempo di inizio espansione a 25°C)  $\geq 40$  secondi.

L'applicazione di tale tecnica permette, come il lettore potrà direttamente constatare, di definire nelle tre dimensioni spaziali (ERT-3D), con geometrie dell'apparato di misura appositamente progettate, la distribuzione della resistività elettrica nel sottosuolo, anche sotto il fabbricato stesso, dove spesso non possono arrivare le usuali indagini geotecniche (sondaggi meccanici, prove penetrometriche). Da questa distribuzione, con un numero molto ridotto di indagini dirette di "taratura", si potrà ottenere il modello geolitologico locale del terreno sotto all'impronta del fabbricato soggetto a cedimento. In questo modo la tecnica ERT estende a tutto il sottosuolo investigato le informazioni, precise ma spazialmente limitate al punto di misura, che le summenzionate indagini geotecniche sono in grado di fornire, permettendo innanzitutto di stabilire le cause del cedimento stesso. Il naturale secondo passaggio è quello di seguire passo-passo gli effetti dell'iniezione delle usuali resine espandenti poliuretaniche, ripetendo l'indagine ERT-4D e suggerendo le eventuali

modifiche da apportare alla griglia di iniezione, approfittando in ciò del contrasto di resistività elettrica tra le porzioni di terreno trattate con resina e le usuali litologie superficiali. Alla chiusura dell'intervento l'ERT permette di comprendere se la causa del cedimento è stata effettivamente rimossa: ad esempio, se causa del cedimento è l'acqua, questa sia stata effettivamente allontanata grazie all'iniezione delle resine. L'abbinamento dell'indagine ERT 3D/4D con la tecnica di consolidamento mediante iniezioni di resine espandenti, oggetto di brevetto Europeo No. EP1914350 di titolarità GEOSEC®, è quindi in grado di "pilotare" efficacemente l'iniezione stessa, evitando di concentrare confinamenti d'acqua anomali sotto le fondazioni del fabbricato, destinati inevitabilmente a prosciugarsi nella stagione secca, così favorendo il ripetersi dei fenomeni di cedimento. GEOSEC negli ultimi anni, sulla base delle esperienze acquisite, ha migliorato lo stato della tecnica nota concentrando l'attenzione proprio sulla determinazione di sistemi e criteri diagnostici e di progettazione che potessero tenere in considerazione in una visione tridimensionale tutte e tre le fasi costituenti un terreno, non solo quella solida, ma anche quelle fluida (acqua) e gassosa (vuoti). Pertanto ben si addice l'integrazione del processo di iniezione con sistemi di monitoraggio ERT-3D/4D, che sono in grado di definire, con opportune tarature, la presenza di cavità e acqua interstiziale nel terreno, cioè le cause più frequenti del dissesto, e di seguirne poi l'evoluzione nel corso del trattamento. Alla tomografia della resistività elettrica quindi viene demandato il compito di verificare nel terreno, nelle 3 dimensioni, gli effetti "qualitativi" delle iniezioni, ossia di verificare se in forza della resina iniettata siano state correttamente riempite le eventuali cavità e/o si sia allontanata dalla fondazione ceduta l'acqua interstiziale in eccesso.

## 2. Introduzione

Quale è in generale l'indagine migliore nella risoluzione di un problema geotecnico? Per rispondere a questa domanda occorre più che mai riscoprire l'importanza di un approccio tecnico critico nella scelta e nell'utilizzo delle prove e delle metodologie diagnostiche nei problemi legati all'ingegneria civile.

Spesso è una frettolosa quanto sommaria valutazione, per lo più basata su elementi di ordine economico, che induce tecnici e soprattutto clienti a privarsi di studi e indagini adeguate, mentre il danno che spesso ne consegue si rivela solo in seguito, con evidenti ripercussioni sull'opera nel tempo e spesso comportando una spesa ben maggiore di quella che si voleva inizialmente evitare.

Un approccio convenzionale, anche alla luce delle recenti Norme Tecniche sulle Costruzioni (D.M. 14 gennaio 2008), deve considerare uno studio preliminare del contesto nel quale s'inquadra il problema, studio volto ad identificarne con precisione le cause e conseguenze, anche in relazione alle specifiche condizioni al contorno.

Ciò rende imprescindibili la scelta e il conseguente utilizzo di strumenti dedicati alle misure di quei parametri ritenuti necessari a risolvere il quesito iniziale, così come è emerso dagli studi effettuati su test site a vera grandezza per la verifica dell'efficienza dei trattamenti.

*"I risultati evidenziano potenzialità di integrazione tra le analisi geotecniche e le indagini geofisiche, nella definizione di un procedimento geotecnico-geofisico da applicare sia in fase di progetto, sia in fase di verifica degli interventi di consolidamento con resine espandenti"* (Apuani T. et Al., AGI XXIV convegno Nazionale di Geotecnica - Napoli 22-24 Giugno 2011). In questo quaderno vogliamo brevemente soffermarci sulle tecniche di prova e d'indagine del terreno interessato da problemi di cedimento differenziale, in relazione agli interventi risolutivi con la metodologia delle iniezioni di resine espandenti, suggerendo nel caso un preciso riferimento nell'approccio diagnostico di supporto al progetto, alla modellazione e alla verifica di questi moderni interventi di *consolidamento del terreno*<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> *Consolidamento del terreno*: è l'insieme dei processi per i quali i terreni subiscono delle modificazioni fisiche e chimiche di alcune caratteristiche geotecniche, quali: compressibilità, resistenza a taglio, permeabilità. I processi di consolidamento del terreno sono suddivisibili in due principali categorie: processi di addensamento e processi di stabilizzazione. (Casadio – Elmi, Il Manuale del Geologo, Pitagora Editrice Bologna).

## 3. Il monitoraggio della costruzione geotecnica

Il comportamento della *"costruzione geotecnica"*, laddove con questa espressione s'intende tecnicamente il manufatto che interagisce con il terreno, dipende sia dai carichi esercitati in fondazione che dalle caratteristiche del sottosuolo all'interno del volume significativo.

Nell'ambito degli interventi di consolidamento del terreno il tecnico progettista si confronta abitualmente con una moltitudine di materiali eterogenei presenti in natura e, per quanto elevato e attento possa essere il numero dei campioni prelevati o delle verticali di prova in sito, non potrà mai avere la certezza che la variabilità delle caratteristiche di un terreno sia sempre rappresentata con presunzione di completezza esauriente.

Infatti, al contrario di una normale progettazione ingegneristica (strutture, impianti etc.) il progetto geotecnico si basa ancor oggi fundamentalmente sul giudizio del professionista nella scelta dei valori più probabili tra quelli ritenuti possibili. L'obiettivo delle indagini in sito è quello di identificare, per quanto possibile, un modello semplificato della realtà fisica passando per procedure e metodi di progettazione che conducano ad una soluzione affidabile ed efficiente del problema. Nella fattispecie, man mano che l'intervento di consolidamento procede, si monitorano i parametri risultanti più significativi e si osserva il conseguente comportamento dell'opera anche in funzione del modello progettuale adottato, modificando laddove necessario e possibile le scelte iniziali. Per questo possiamo affermare che il monitoraggio in corso d'opera è spesso parte integrante del processo progettuale esecutivo, e la strumentazione adottata costituisce il mezzo adeguato di osservazione e successiva valutazione. Nell'ambito dunque degli interventi di contrasto ai *cedimenti differenziali*<sup>2</sup> del terreno sono molteplici gli strumenti tenuti in considerazione dal progettista / direttore dei lavori: da quelli destinati all'acquisizione dello stato fessurativo / deformativo della struttura ceduta, a quelli di tipo geotecnico per l'acquisizione (puntuale) di parametri meccanici del terreno, a quelli di tipo geofisico ed in particolare a quelli utili alla definizione

<sup>2</sup> *Cedimenti differenziali*: Quando una struttura di fondazione cede, la sua deformata può dipendere da un cedimento uniforme oppure di tipo rotazionale. Presi due punti A e B della deformata, la differenza geometrica  $\delta_{ab} = (\delta_b - \delta_a)$  dei relativi cedimenti misurati in A e B rappresenta il cedimento differenziale che a sua volta causa una distorsione angolare tra i punti stessi  $\beta_{ab}$ . (wahls 1981).

di un modello tridimensionale che restituisca informazioni affidabili, ad esempio sulla distribuzione delle litologie, delle cavità e delle strutture sepolte, dei flussi/concentrazioni d'acqua presenti nel sottosuolo e delle variazioni nel tempo di queste proprietà durante l'azione chimica e meccanica esercitata dalle resine poliuretatiche espandenti, fermi restando i dettami delle norme tecniche vigenti.

#### 4. Cenni sulle prove meccaniche

Diverse sono le prove meccaniche del terreno a supporto degli interventi di consolidamento con resine espandenti e tra quelle ad oggi più utilizzate vi sono certamente le prove penetrometriche sia statiche che dinamiche. Tra quelle dinamiche citiamo innanzitutto lo Standard Penetration Test (SPT)<sup>3</sup> con il quale si determina il numero di colpi (Nspt) necessari ad infiggere, per una data profondità, un tubo campionatore o una punta chiusa di dimensioni standardizzate lasciando cadere un maglio di massa predefinita da un'altezza prefissata. La prova SPT dovrebbe essere effettuata in fori appositamente eseguiti che però spesso per comodità sono in concomitanza di altri sondaggi geotecnici. Le Dynamic Probing (DP) sono invece prove penetrometriche dinamiche continue che non necessitano di predisposizioni in foro risultando per questo decisamente più economiche e semplici nell'utilizzo. Sono suddivise in quattro classi secondo il peso della massa battente M (classificazione ISSMFE 1988):

Tipo	Sigla	Peso della massa battente	Profondità massima indagine battente
Leggero	DPL	$M \leq 10 \text{ kg}$	8 mt
Medio	DPM	$10 \text{ kg} < M < 40 \text{ kg}$	20 - 25 mt
Pesante	DPH	$40 \text{ kg} \leq M < 60 \text{ kg}$	25 mt
Super Pesante	DPSH	$M \geq 60 \text{ kg}$	25 mt

<sup>3</sup> SPT (Standard Penetration Test): prova in cui si misura il numero di colpi necessario per infiggere un campionatore standard per la profondità di 30 cm (1 piede), battendo con un maglio di 63,5 kg (140 libbre) e con una altezza di caduta di 76 cm.

Queste prove sono preferibilmente eseguite in terreni granulari (sabbie e ghiaie) ed è possibile comunque con i dovuti accorgimenti realizzarle in qualsiasi terreno sciolto ed anche in presenza di alcune rocce tenere, mentre nel caso di grossi elementi lapidei (blocchi - clasti), questa tipologia di prova perde totalmente di significato.

Grazie a molteplici correlazioni empiriche è possibile poi stimare in modo più o meno affidabile:

- la densità relativa ( $D_R$ )
- l'angolo di resistenza al taglio di picco ( $\phi'$ )
- la resistenza alla liquefazione ( $\tau_1/\sigma'_{vo}$ ) dei terreni granulari;
- il modulo di taglio a piccole deformazioni ( $G_0$ );
- la resistenza al taglio non drenata  $c_u$  di terreni a grana fine.

Per contro la DP rimane anch'essa una prova puntuale e quindi limitata allo stretto intorno della verticale di indagine, ed in genere subisce fortemente l'influenza delle caratteristiche dell'attrezzatura impiegata, delle modalità esecutive della prova e non da ultimo della preparazione professionale dell'operatore.

La prova penetrometrica statica (CPT - Cone Penetration Test) consiste invece nell'eseguire una spinta verticalmente nel terreno, mediante pressione su di una punta conica di dimensioni standard, misurando separatamente, ma con continuità, sia lo sforzo per penetrare che l'adesione di un manicotto posto sopra alla punta di penetrazione mentre questa avanza nel terreno.

La storia di queste prove è nota fin dal 1917, quando venne impiegata durante i lavori di costruzione delle ferrovie Svedesi. Successivamente, già dal 1934, la prova ha subito importanti modifiche che l'hanno resa molto simile a quella impiegata ai giorni nostri.

La CPT può fornire dati più attendibili sulla stratigrafia dei terreni attraversati, in particolare se abbinata a sondaggi diretti quali carotaggi e scavi in situ.

Inoltre i risultati di questa prova possono essere utilizzati per determinare alcune proprietà meccaniche del terreno indagato, quali ad esempio la resistenza e la deformabilità di terreni che in genere e preferibilmente devono essere fini e sabbiosi.

Se poi la prova è abbinata al piezocono (CPTU), le rilevazioni acquistano maggior precisione e si arricchiscono di informazioni anche in merito al livello idrostatico dell'eventuale falda nel terreno o piuttosto delle caratteristiche di consolidazione e di permeabilità dei terreni coesivi saturi. Più in generale tutte le prove penetrometriche forniscono

informazioni lungo la verticale del punto del terreno indagato, perdendo inevitabilmente di definizione man mano che ci si allontana e per causa della nota eterogeneità tipica dei terreni e soprattutto di quelli superficiali.

Per questo motivo occorre definire un multiplo di prove purché opportunamente distribuite sul terreno da indagare e/o da consolidare. Tuttavia per le prove penetrometriche rimane ancora una certa difficoltà di interpretazione, soprattutto nel merito di verifiche delle caratteristiche sforzo / deformazione e di quelle di resistenza dei terreni.

In particolare Jamiolkovski (1988) ne evidenziò diverse, quali fonte di significativa incertezza per il geologo:

1) Escludendo prove pressiometriche e alcune prove geofisiche, tutte le altre prove in sito presentano problemi complessi di interpretazione teorica delle condizioni al contorno, anche perché limitate allo stretto intorno della verticale di indagine.

2) Le condizioni di drenaggio durante le prove di sito sono in genere scarsamente controllabili e spesso presentano la concreta difficoltà al tecnico di stabilire se i risultati ottenuti sono da riferirsi a condizioni drenate, non drenate o parzialmente drenate. Problema che a maggior ragione si verifica negli interventi con resine, laddove il prodotto iniettato comprime la litologia in contatto secondo la sua forza meccanica di espansione che è funzione della velocità di reazione della resina (da pochi secondi a diversi minuti), mentre i tempi necessari di consolidazione dei terreni possono risultare molto più lunghi (giorni, mesi, anni).

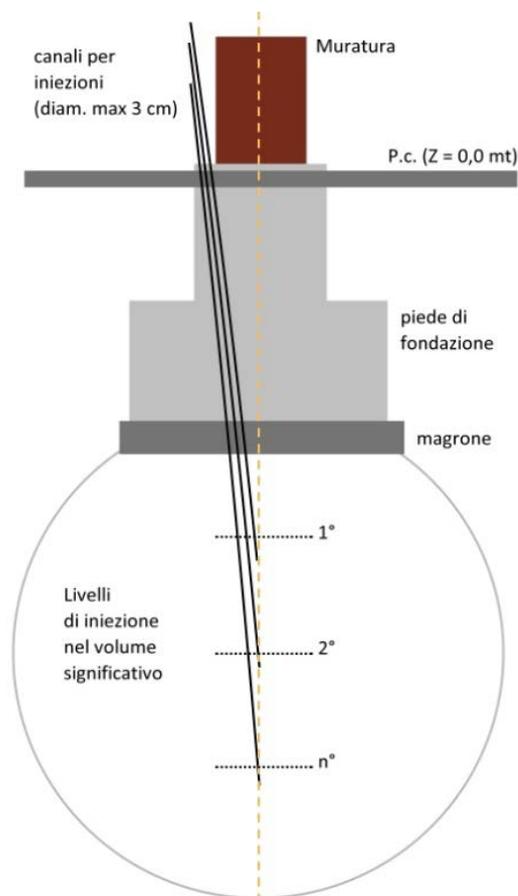
Spesso un terreno sottoposto a prova meccanica in sito, manifesta andamenti di sforzi efficaci molto diversi da quelli canonici dell'ingegneria civile, con conseguenti difficoltà di interpretazione dei valori di sforzo/deformazione a causa della marcata eterogeneità dei terreni stessi in evidente comportamento non lineare.

3) **Al contrario del comune pensiero esiste ancora una elevata dose di empirismo e di semplificazione di tutte le assunzioni connesse all'interpretazione dei dati ottenuti.**

4) Si evidenziano inoltre limitazioni operative di esecuzione della prova.

Nel caso degli interventi di consolidamento mediante iniezione di resine espandenti, sappiamo che le iniezioni sono indirizzate prevalentemente sotto all'impronta della costruzione ceduta mediante a piccoli canali, posati - non necessariamente attraversando la fondazione - e leggermente inclinati

rispetto alla verticale, che consentono di raggiungere il terreno ceduto in posizione il più possibile baricentrica rispetto alla verticale e in modo da confinare il più possibile l'effetto consolidante nel volume significativo (figura 1):



**Figura 1** – geometria di perforazione per la predisposizione dei canali di iniezione a diversi livelli di profondità in un approssimativo volume significativo (Geosec, 2010).

L'utilizzo del penetrometro carrellato o semovente per causa del suo ingombro, indurrebbe erroneamente a procedere con prove molto inclinate al fine di poter raggiungere il volume di terreno ceduto/consolidato, per non parlare infine di quelle strutture portanti di fondazione che sono collocate all'interno dell'edificio e che non sarebbero agevolmente raggiungibili dalla strumentazione di prova senza dover prima effettuare demolizioni per l'allargamento dei varchi di accesso. Sappiamo infatti che le resine espandenti, per loro natura sono studiate appositamente per confinarsi all'interno del volume significativo (figura 2) ovvero

quel volume di terreno che interagisce con l'edificio e i loro maggiori effetti consolidanti sono riscontrabili generalmente in un raggio d'azione massimo di circa 1 - 1,5 mt dal punto stesso d'iniezione.

Appare dunque intuitivo identificare il punto più idoneo per poter rilevare le condizioni del terreno di fondazione e successivamente effettuare la verifica del trattamento, proprio nel **cuore** del bulbo delle pressioni<sup>4</sup>, zona che spesso a causa della geometria della fondazione e dell'ingombro della strumentazione di rilievo meccanico, diviene operativamente difficile raggiungere e indagare con ragionevole precisione.

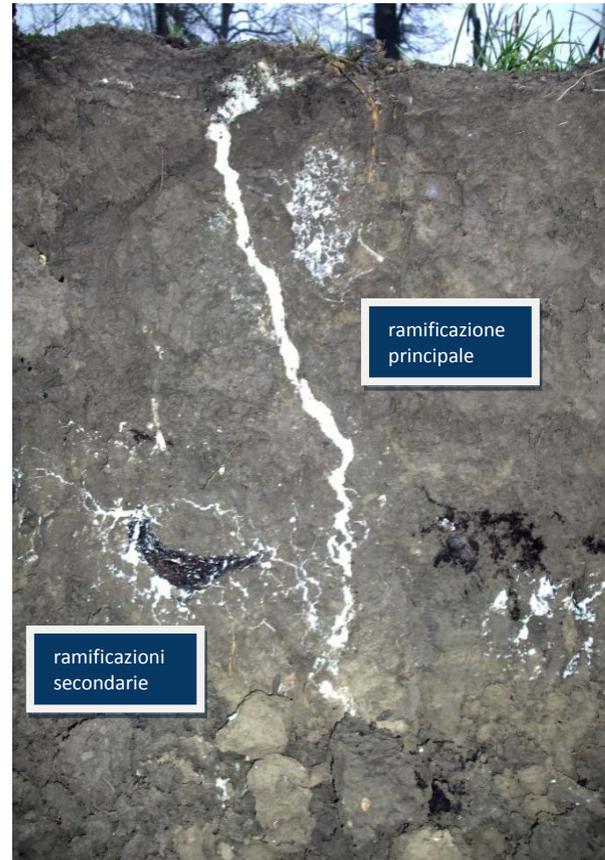
Al contrario invece se le prove penetrometriche sono abbinata/sovrapposte alle indagini geoelettriche permettono di definire una taratura del modello acquisito, con una definizione spaziale della stratigrafia del terreno. Di seguito un esempio di efficace correlazione tra risultati di prova penetrometrica statica e indagine geoelettrica.

Per l'interpretazione litologica si è adottato il criterio di Schmertmann (1978) consigliato per CPT.

Ricavati i valori di resistenza alla punta  $R_p$  e di resistenza laterale  $RL$  è stato in questo caso possibile sovrapporre l'informazione meccanica all'immagine ERT nella sezione corrispondente alla sua verticale di prova (figura 3):



a)



b)

**Figura 2 (a,b)** – a) ricostruzione dei filamenti di resina inerte secondo una diramazione a "radice" nel volume significativo, b) sezione di scavo a benna liscia in prossimità di una iniezione superficiale (Geosec, 2010).

<sup>4</sup> *Bulbo di pressione*: zona in un terreno caricato, delimitata da una isobara arbitrariamente scelta.

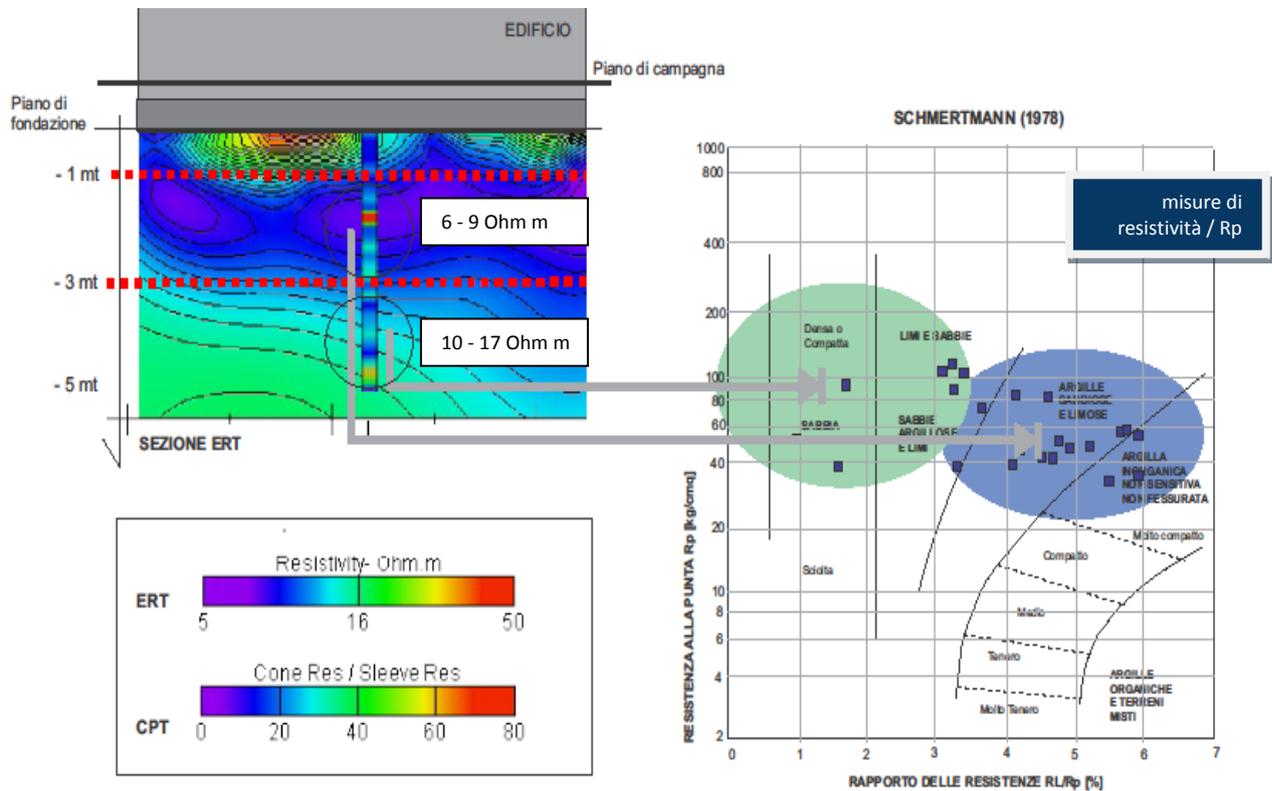


Figura 3 – Ologramma della resistività elettrica nel volume significativo e carta di classificazione per il penetrometro statico (Schmertmann 1978). Correlazione locale dei valori di resistività e resistenza alla punta.



Figura 4 – Un volume di terreno prelevato da sito consolidato con iniezione di resine espandenti. In bianco sono visibili i filamenti di resina poliuretanicata allo stato inerte (Occhi, 2010. Test Site Emilia Romagna).

## 5. Le indagini Geofisiche

Negli ultimi anni la Geofisica Applicata ha compiuto passi da gigante nella diagnostica a supporto dell'ingegneria civile, in conseguenza dell'evoluzione delle strumentazioni di misura, degli algoritmi di modellazione e dei relativi software interpretativi, delle accresciute prestazioni dei calcolatori elettronici e non da ultimo grazie alle maggiori esperienze acquisite sul campo dagli operatori. Il supporto diagnostico della Geofisica Applicata si rivela, in particolare, sempre più efficace (e a costi sempre più contenuti) per quei contesti in cui:

- diviene necessaria una visione tridimensionale del problema oggetto di studio, abbinata ad una rinnovata esigenza di minor invasività e flessibilità nell'operare;
- il contesto investigato presenta una marcata anisotropia ed una eterogeneità delle condizioni al contorno;

- le dinamiche (flussi e/o provenienza, concentrazioni etc.) e le condizioni dei fluidi presenti nel terreno condizionano il contesto, oggetto dell'intervento.
- è necessaria una taratura delle prove meccaniche.

Allora perché la geofisica applicata moderna, sebbene abbia raggiunto queste vette d'avanguardia tecnologica, è ancor oggi vista da molti tecnici con moderato scetticismo?

Ci sono diverse risposte a questa domanda, che possono essere riassunte come segue:

a) scarsa conoscenza delle metodologie geofisiche e dei loro fondamenti da parte del tecnico ordinario, sono ritenute talvolta strumenti e conoscenze troppo complesse e non comuni in mano a pochi professionisti di settore fortemente specializzati;

b) non mancano purtroppo gli avventurieri verso i quali porre sempre la massima attenzione, cosa non facile se l'utente finale non è correttamente "informato";

c) predominante logica dei costi: il Committente esige il miglior risultato con la minor spesa necessaria, pur non essendo in grado di valutare direttamente le proposte e le professionalità che gli si offrono, spesso senza soffermarsi saggiamente sul potenziale risparmio proveniente da un'approfondita analisi del problema e dalla successiva verifica adeguata di ogni intervento, per evitare poi ripristini, ripetizioni o nuovi interventi riparatori nel tempo;

d) standardizzazione della diagnostica verso quegli strumenti che sono considerati, tradizionalmente o per pregiudizio, più noti e facili da governare e dunque controllabili da una potenziale Direzione Lavori forgiata fin dai primi studi universitari su parametri esclusivamente geotecnici. Molti tecnici infatti sposano forse troppo frettolosamente il concetto, a volte ingiustificato, che le prove meccaniche in situ siano più affidabili delle indagini geofisiche, perseguendo un pregiudizio concettualmente non corretto e dimenticando invece che non esiste l'indagine migliore, ma quella più adeguata all'analisi di quello specifico problema e che prove/indagini spesso si rivelano tutte certamente bisognose di confronto e integrazione tra loro. Spesso poi si tende a trascurare l'importanza della figura del geologo, talvolta inteso come colui che deve solo occuparsi di eseguire prove e indagini a servizio dell'ingegnere geotecnico.

Riteniamo infatti che invece le due figure professionali debbano essere quantomeno complementari soprattutto nell'ambito delle problematiche legate ai trattamenti di stabilizzazione e/o miglioramento dei terreni. Ancor più grave infine, ad avviso di chi scrive, è ancora la pratica del "fai da te". Oggi assistiamo ad una prassi molto diffusa, fondata su approcci tanto superficiali quanto limitati, che talvolta nemmeno tengono in considerazione dell'aspetto diagnostico e di analisi del problema, costantemente rivolti ad una standardizzazione imprenditoriale delle problematiche, certamente in partenza economicamente più vantaggiose, ma non sempre altrettanto efficaci e risolutive nel tempo;

e) scarsa attività di informazione tecnica: la Geofisica applicata è ancora una scienza poco diffusa nell'Ingegneria civile ordinaria Italiana e talvolta prevalentemente considerata scienza di "nicchia", spesso conosciuta come riservata a problematiche specifiche quali la ricerca petrolifera e delle materie prime, la difesa ambientale, l'archeologia, l'attività militare, escludendo talvolta per pregiudizio o per ignoranza applicazioni nella casistica quotidiana degli interventi civili ordinari, ove vantaggiosamente potrebbe essere spesso di grande aiuto al geologo ed all'ingegnere civile in fase di valutazione preliminare, progettazione e verifica/collauda degli interventi. Risulta quindi indispensabile operare secondo un approccio concreto e critico basato in generale sulla professionalità di un tecnico competente che:

- 1) stabilisca ed effettui una diagnostica adeguata preliminare del problema volta ad identificarne le cause;
- 2) istruisca un progetto personalizzato dell'intervento non necessariamente numericamente modellato e definisca i criteri di verifica;
- 3) si affidi ad un'impresa idonea ad eseguire quell'intervento con riconosciuti requisiti di esperienza, personale tecnico interno qualificato, dotazione propria di strumenti e attrezzature, assistenza sul cantiere costante, organizzazione comprovata, certificazioni sui procedimenti adottati e sui materiali etc.;
- 4) effettui le verifiche sull'intervento sia in corso d'opera che ad intervento avvenuto.

## 6. Il Cedimento differenziale nei consolidamenti con resine

Quando si vuole risolvere un cedimento differenziale di tipo verticale con iniezioni di resine espandenti<sup>5</sup> sotto al fabbricato occorre dapprima soffermarsi su alcuni aspetti che per esperienza diretta riteniamo fondamentali. **Per prima cosa occorre capire cosa ha causato il cedimento differenziale.**

Si deve quindi valutare nel sistema terreno/struttura ove e in che modo si sia innescato il cedimento e se risulterà dipendente da modifiche/variazioni all'edificio di tipo strutturale, quali ad esempio livelli di carico aggiuntivi o nuove distribuzioni dei carichi in fondazione.

Per questi casi possiamo ipotizzare che il terreno sottostante alla costruzione non risulti più idoneo alla nuova geometria/entità dei carichi in fondazione.

Ecco allora che il problema non sarà più riconducibile a difetti/anomalie proprie del terreno quali alterazioni antropiche o naturali del suolo di fondazione, bensì ragionevolmente alle modifiche strutturali effettuate sul fabbricato stesso in modo e tali da risultare non più adeguate al vecchio sistema terreno/fondazione.

In questi contesti è possibile intervenire in diversi modi secondo un approccio più ingegneristico e geotecnico, agendo ad esempio sulle strutture di fondazione (allargamenti della base di appoggio, rinforzi del piede, trasferimenti di carico a strati di terreno più consolidati etc.) oppure, trascurando la struttura fuori terra, agendo direttamente sul terreno di fondazione con interventi di incremento della capacità portante.

Così facendo le resine espandenti possono sortire un'efficace azione di compattazione del sottofondo di fondazione e fino al valore di progetto perseguito.

In questo caso il rilievo puntuale dei parametri meccanici permette di definire un quadro quantitativo della resistenza meccanica del terreno ma solo in quel preciso punto vicino all'iniezione della resina. A questo scopo sono di utilità prove penetrometriche pensate anche in multisessione ed il più possibile distribuite nei punti ritenuti tecnicamente idonei dal tecnico di fiducia esperto e qualificato (ingegnere e/o geologo).

Per interpolazione matematica poi si potranno ipotizzare delle variazioni di valori lungo il profilo di indagine ma sempre con inevitabile e residua difficoltà

<sup>5</sup> *Resine espandenti*: formulati chimici termoplastici poliuretanicici mono o bi componente. Gli applicatori professionali distinguono genericamente queste resine per consolidamento in due principali categorie: quelle a rapido inizio di espansione e quelle a lento inizio di espansione.

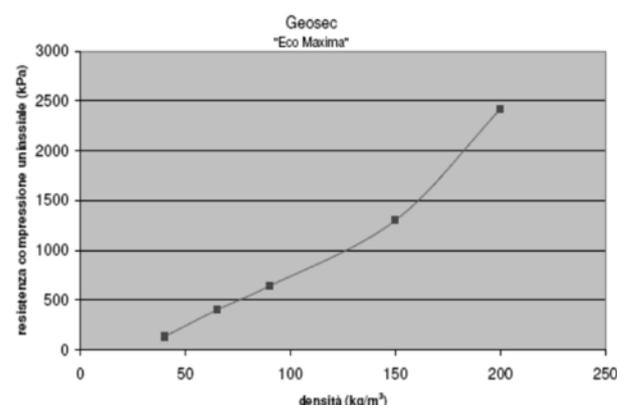
di modellazione numerica / interpretazione dei valori di sforzo-deformazione del terreno a causa delle anisotropie e/o delle marcate eterogeneità dei terreni che hanno dato luogo ai cedimenti differenziali.

Essendo poi il terreno costituito da tre fasi (solida, liquida e gassosa) occorre porre molta attenzione alla sua mutazione fisico-chimica in conseguenza dell'iniezione. Infatti, quando una resina espandente ad esempio viene iniettata in un terreno con forte presenza di vuoti, questa, grazie alla sua reazione chimica, in parte si legherà allo scheletro solido del terreno, riempiendo vuoti e in parte spiazzando l'acqua interstiziale dapprima presente.

Nei terreni coesivi ed in particolare quelli "argillosi", sappiamo invece che la presenza d'acqua può essere particolarmente rilevante soprattutto in occasione dei periodi più piovosi dell'anno. L'acqua (incomprimibile) in queste particolari litologie coesive risulta assai difficile da spiazzare rapidamente, si pone quindi il problema di capire come gestire l'iniezione di resina espandente in condizioni scarsamente drenate del terreno.

A titolo di esempio, e rimandando al prossimo quaderno n. 4 dedicato interamente alla resina Geosec, si mostra in figura 5 l'andamento della resistenza a compressione uniaassiale della resina MAXIMA® in funzione delle diverse densità del formulato (Geosec, 2006).

La resina ha dimostrato considerevoli proprietà di resistenza alla compressione e buone capacità di resistenza a trazione e a flessione.



**Figura 5.** Resistenza a compressione monoassiale di provini di resina Geosec MAXIMA®, (valori medi su 6 provini,) determinata secondo norma UNI 6350-68.

Osserviamo infatti come il processo di consolidazione del terreno trattato avvenga con tempi che spesso sono ben più lunghi (mesi, anni) di quelli di reazione

ed espansione meccanica delle resine iniettate (secondi, minuti).

Ecco allora che ad esempio in alcune particolari condizioni, l'acqua interstiziale, spinta dalla resina (in fase di espansione), essendo come detto incompressibile non si allontanerà con la stessa immediatezza rispetto all'azione meccanica della forza espandente.

Quest'acqua quindi, se si trovasse confinata sotto alla fondazione e senza immediate vie di "uscita" e spinta dalla resina sottostante in fase di espansione, potrebbe nell'immediato contribuire al sollevamento meccanico del fabbricato per poi successivamente redistribuirsi secondo la permeabilità del mezzo che l'accoglie e secondo tempi decisamente più lunghi rispetto a quelli della reazione chimica espandente. Appare quindi evidente l'importanza fondamentale del riscontro della presenza e della distribuzione d'acqua nel terreno da trattare prima delle iniezioni.

Diverso quindi sarebbe il caso in cui il cedimento differenziale risultasse effetto di cause legate alle condizioni del terreno di fondazione in mutato equilibrio rispetto a quelle originarie, soprattutto in riferimento all'assenza di modifiche sulle strutture del fabbricato. In questi casi azioni naturali (variazioni climatiche, interferenza con falde e flussi di fluido nel terreno, piante ad alto fusto etc.) e azioni antropiche (vibrazioni da traffico veicolare intenso, scavi limitrofi, perdite fognarie etc.) possono alterare gli equilibri del sistema e innescare cedimenti differenziali anche rapidi ed evidenti.



a)



b)



c)

**Figura 6** – a), b), c) alcune condizioni di disturbo dell'equilibrio nel sistema terreno / fondazione (Geosec, 2009).

E' chiaro che, se in questo contesto specifico è il terreno di fondazione ad aver subito una mutazione rispetto alle condizioni originarie e spesso per causa della presenza d'acqua e vuoti. Occorrerà allora indagare al suo interno con strumentazioni e diagnostiche adeguate per poter cogliere le cause scatenanti il cedimento e poter successivamente progettare un adeguato intervento risolutivo ed efficiente. Ecco allora che in tutti quei casi ove ad esempio il cedimento è figlio di una perdita fognaria o di fluidi in circolo nel terreno, ove è la presenza di argille rigonfianti particolarmente sensibili alle ciclicità stagionali, ove sono rilevate forti vibrazioni che hanno provocato nuove porosità, ove l'azione di una pianta d'alto fusto ha creato discontinuità efficaci sotto o prossime ad una fondazione, diviene fondamentale estendere l'analisi del problema ad una visione più aperta e tridimensionale del contesto, che permetta al progettista di capire, nella rinnovata eterogeneità dei terreni e nella difficoltà di monitorare un fluido in movimento al suo interno, quali siano le effettive distribuzioni spaziali dei parametri in gioco e le loro correlazioni con il problema del cedimento in corso.

## 7. Il supporto dell'indagine geoelettrica alle iniezioni di resine espandenti

Indagini geofisiche non invasive basate sulla resistività elettrica, mediante le più attuali tecniche tomografiche tri-dimensionali o meglio di imaging forniscono informazioni che ben descrivono la distribuzione spaziale di fluidi, porosità, cavità sepolte, cioè di quelle caratteristiche del sottosuolo alle quali la resistività elettrica è particolarmente sensibile, e in abbinamento ad una prova meccanica permettono di arricchire e meglio definire la litologia del sottosuolo investigato nelle 3 dimensioni spaziali. Se sovrapposte poi ad informazioni sulla dinamica nel tempo dei cedimenti strutturali rilevati fuori terra possono aiutare il tecnico progettista nella valutazione delle cause che hanno generato il cedimento (es. dilavamenti, ristagni d'acqua etc.), informazioni utili che permettono progettare, controllare e validare il proprio lavoro durante un intervento con resine espandenti. Ma perché determinare la distribuzione della resistività elettrica negli interventi con resine? Le ragioni che inducono a tenere in considerazione questo parametro di indagine sono diverse e riassumibili nei punti seguenti:

1) Innanzi tutto, come abbiamo avuto modo di analizzare in precedenza, il cedimento differenziale **non sempre è in assoluto un esclusivo problema di incremento di capacità portante del terreno di fondazione, semmai è da intendersi più rilevante il "come" si ottiene questo incremento e se tale effetto è garantibile nel tempo sull'opera.** Certamente la compattazione del terreno di fondazione, grazie alla forza espandente delle resine, è uno dei diversi risultati finali ottenuti, ma a monte dunque occorre prima definire come poter raggiungere correttamente questa compattazione. Le resine espandenti di tipo poliuretano, contrariamente a quanto si possa comunemente pensare, non sono iniettate ad alte pressioni bensì sfruttano la notevole forza di espansione governata esclusivamente dalla reazione chimica del formulato stesso, la cui entità meccanica è definita semplicemente dal contrasto offerto dall'ambiente che accoglie l'iniezione in termini di peso del terreno e fabbricato, della tipologia del terreno etc. La velocità di reazione poi è generalmente rapida rispetto ai tempi di consolidazione dei terreni coesivi. In questi casi infatti e in modo ancor più evidente, potranno confinarsi, grazie alla spinta meccanica della resina in fase di espansione (punto di massima energia), volumi di acqua interstiziale

compressa (sovrappressioni interstiziali) al di sotto delle fondazioni. Inevitabilmente dopo giorni e/o settimane si indurranno man mano moti di filtrazione dell'acqua interstiziale volti a dissipare il sovraccarico subito in partenza e secondo velocità di flusso che dipenderanno ovviamente dal coefficiente di permeabilità del mezzo attraversato. La presenza di queste concentrazioni d'acqua andrà pertanto monitorata con attenzione prima e durante il trattamento affinché, laddove possibile, siano efficacemente dissipate e/o allontanate dal volume significativo della fondazione agendo con il minimo impatto meccanico al sistema, calibrando iniezioni anche a piccole dosi, meglio a nostro avviso se intervallate a pause di riposo (minuti) tra una sessione d'iniezione e l'altra. Come detto, la resistività del sottosuolo di fondazione è fortemente condizionata dalla presenza di acqua, quindi le variazioni dei fluidi prima, durante e dopo le iniezioni sono ben descritte dalla tomografia sequenziale della resistività elettrica, la quale è in grado di dimostrare vantaggiosamente se durante un intervento di consolidamento l'acqua interstiziale, spinta dall'espansione della resina (sopportando inizialmente tutto il carico della spinta) partecipa all'azione di compressione anche dopo chilogrammi di resina iniettata.

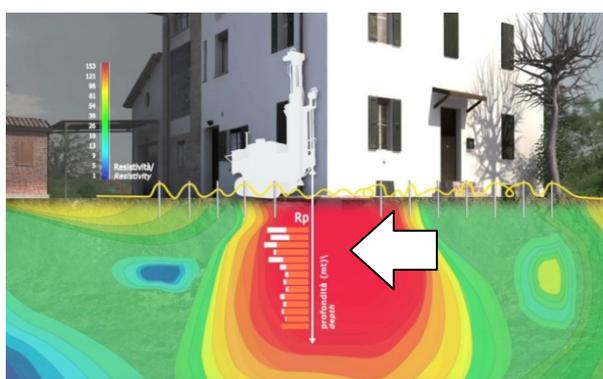
2) **Buona parte delle litologie che incontriamo nei suoli superficiali (es. argille, limi, sabbie) hanno intervalli di valori di resistività caratteristici che le rende spesso distinguibili le une dalle altre.**

Lo stesso principio vale per il confronto tra suoli e materiali di cui si compongono le fondazioni. Tali intervalli sono espressi sinteticamente nella seguente tabella:

Litotipo	Resistività ( $\Omega m$ )
Acqua dolce	10 - 100
Acqua di mare	0.2 - 0.3
Sabbie sciolte secche	~1000
Sabbie sciolte sature in acqua dolce	80 - 150
Limi saturi in acqua dolce	15 - 50
Argille sature in acqua dolce	5 - 20
Ghiaie asciutte	> 1000
Ghiaie sature in acqua dolce	150 - 300

3) **Le resine espandenti per iniezione sono per alcuni contesti marcatamente di contrasto con il terreno di fondazione.**

Appare chiaro quindi che le indagini geoelettriche nella restituzione della tomografia 3D possano rappresentare per il geologo un ottimo supporto diagnostico negli interventi di contrasto dei cedimenti mediante resine espandenti e nei diversi stadi di evoluzione dell'intervento stesso. La tomografia elettrica in pre-intervento rende disponibile (previo taratura con prova meccanica in situ) una prima classificazione dei terreni incontrati (sabbiosi, argillosi, ecc), consente inoltre di evidenziare anomalie importanti nel sottosuolo che possono rappresentare elementi geologici distintivi o cause dirette o indirette del dissesto (concentrazioni di acqua e/o umidità, volumi dilatati della porzione fine per causa di perdite fognarie o vibrazioni, discontinuità del tipo argille/roccia, riporti/argille). Le tomografie elettriche inoltre possono essere integrate e sovrapposte con le informazioni sulle dinamiche strutturali del cedimento (monitoraggio del quadro fessurativo dell'edificio) e non ultimo (quando necessario) con prove meccaniche puntuali in situ da dislocare con l'aiuto della stessa tomografia elettrica (figura 7). L'insieme di queste risultanze diagnostiche consente dunque di definire al meglio i diversi parametri progettuali dell'intervento.



**Figura 7** – L'immagine della tomografia elettrica può essere tarata con la verticale penetrometrica (Geosec, 2009).

In corso d'opera, tomografie elettriche eseguite quasi in tempo reale e a diverse cadenze temporali consentono di verificare lo stato di avanzamento delle iniezioni ed eventualmente di modificare/integrare i parametri iniziali di progetto.

Al termine dell'intervento le misure in post-iniezione permettono di verificare lo stato finale del sottosuolo in seguito all'iniezione delle resine espandenti e validarne il risultato finale.

## 8. Sviluppo storico delle metodologie geoelettriche (dai sondaggi elettrici alla tomografia tridimensionale di ultima generazione)

A questo punto vale la pena approfondire la conoscenza dei metodi di indagine geoelettrica ai quali abbiamo fatto riferimento. Probabilmente molti tecnici del settore conoscono le tradizionali metodologie di prospezione geoelettrica denominate sondaggi elettrici verticali. Ebbene, quel tipo di indagini, che presuppongono un'ipotesi di modello unidimensionale del terreno (strati piani e paralleli), appaiono oggi come una pratica diagnostica molto primitiva, se confrontata con le moderne tecniche tomografiche di ultima generazione. A partire dai primi anni '80 due fatti nuovi hanno portato ad un rapido sviluppo nelle indagini geoelettriche, da una parte il progresso delle capacità computazionali dei calcolatori ha consentito di risolvere con tecniche numeriche raffinate ed affidabili il problema della interpretazione delle misure, aprendo così la strada alla possibilità di interpretazioni 2D e 3D e, di enorme utilità operativa in cantiere, 4D (3D ripetute nel tempo).



**Figura 8** – Georesistivometro Syscal R1 Plus (fonte: <http://www.resistivity-meters.com/>).

Dall'altro lato, l'avvento dei dispositivi di misura a molti elettrodi (georesistivimetri multielettrodi) hanno consentito di superare le difficoltà pratiche delle misure, connesse alla necessità di spostare continuamente ad ogni misura gli elettrodi, semplificando e velocizzando le operazioni di campagna e rendendo così possibile la raccolta di grosse quantità di dati con il minimo sforzo.

Le misure con dispositivi multi elettrodi vengono effettuate allineando sul terreno gli elettrodi e collegandoli ad un unico cavo multipolare che li connette ad una centralina elettronica.

Un generico equipaggiamento multi elettrodo può essere descritto come un sistema composto di tre parti:

- 1) lo strumento che effettua le misure di resistività;
- 2) la centralina elettronica, o il computer, che controlla lo switch automatico tra gli elettrodi;
- 3) Il sistema dei cavi e degli elettrodi.

Di seguito riportiamo uno schema che riepiloga lo sviluppo, nel corso degli anni, delle tecniche geofisiche di indagine geoelettrica:

METODO	STRUMENTO	GEOMETRIA	INTERPRETAZIONE
SEV - SEO TOMO 2D	Georesistivimetro a 4 elettrodi (multielettrodoica (Syscal R1))	1D Sezioni 2D	Inversione 1D e mappe Inversione 2D
TOMO 3D	Multielettrodoica - multicanale (Syscal PRO)	Griglie 3D	Inversione 3D
3D - HQ	Multielettrodoica - multicanale (aumento elettrodi, high speed, multi array, remote control)	Tutte le geometrie 3D	Inversione 3D e 4D



Figura 9 – Georesistivimetro Syscal PRO (Geostudi Astier srl, 2008).

## 9. Fondamenti scientifici del modello geoelettrico

Con l'espressione "resistività elettrica" (simbolo  $\rho$ ), si intende la proprietà fisica che rappresenta l'attitudine del volume cubico di lato unitario di un materiale a opporre resistenza al passaggio di una corrente elettrica; è cioè una proprietà fisica indipendente dalla geometria del corpo attraversato (la sua unità di misura è l'Ohm-m, che convenzionalmente si abbrevia in  $\Omega \cdot m$ ), mentre con l'espressione "resistenza elettrica" (simbolo  $R$ ) si intende quella grandezza fisica (la cui unità di misura è l'Ohm - simbolo:  $\Omega$  -) che esprime la proprietà di un materiale di forma qualsiasi di opporsi al flusso di corrente elettrica (secondo la prima legge di Ohm la  $R$  di un filo conduttore può essere definita come il rapporto tra la differenza di potenziale tra le sue estremità e l'intensità di corrente che lo attraversa): in altre parole, la resistenza elettrica  $R$  si distingue dalla resistività  $\rho$  per il fatto che  $R$  ( al contrario di  $\rho$  ) dipende anche dalle caratteristiche geometriche del mezzo sottoposto al flusso di corrente.

- Lo scopo della tomografia della resistività elettrica (acronimo ERT: "Electrical Resistivity Tomography") è quello di ri-creare un'immagine tridimensionale della resistività del sottosuolo dalla quale dedurre - nel modo più preciso possibile - le seguenti

informazioni: la geometria della fondazione dell'edificio sul quale si interviene;

- la presenza di vuoti, cavità e strutture sepolte nel medesimo;
- la presenza di umidità e acqua nel terreno stesso e l'eventuale presenza di perdite di fluidi da impianti interrati.

Dal punto di vista del metodo, la E.R.T. riprende la tecnica di misura dei S.E.V., iniettando una corrente elettrica nel mezzo da investigare mediante una coppia di elettrodi e misurando tra altre coppie di elettrodi la distribuzione del potenziale elettrico che ne consegue, ma lo fa utilizzando un numero elevato di elettrodi, disposti simultaneamente sul terreno.

All'atto pratico questo viene ottenuto disponendo una serie di elettrodi - in numero variabile a seconda delle necessità e organizzati secondo una geometria opportunamente studiata, all'interno o sul contorno del mezzo da investigare.

Uno strumento (georesistivimetro) inietta una corrente elettrica continua (energizzazione) in una coppia di elettrodi e misura contemporaneamente potenziali elettrici che ne conseguono su altre coppie. La misura della resistività elettrica viene effettuata dunque utilizzando configurazioni riconducibili ad uno schema di quadripolo.

Si invia nel mezzo mediante due elettrodi (trasmettitori) - in genere indicati con A e B - una corrente nota I e si misura tramite due altri elettrodi (ricevitori) - M e N - la differenza di potenziale  $\Delta V$  che tale corrente produce nei punti del mezzo nel quale sono stati posti gli elettrodi stessi.

Se il mezzo attraversato fosse omogeneo e isotropo, la sua **resistività  $\rho$**  sarebbe fornita direttamente dalla seguente, semplice relazione:

$$\rho = K \cdot \Delta V / I \quad (1)$$

dove K, detto *fattore geometrico* del quadripolo, funzione solo della posizione reciproca degli elettrodi, è dato da:

$$K = 2\pi / (1/r_1 - 1/r_3 - 1/r_2 + 1/r_4) \quad (2)$$

essendo  $r_i$  le distanze reciproche tra i 4 elettrodi. Se il mezzo è disomogeneo, la differenza di potenziale  $\Delta V$  è funzione, oltre che delle distanze tra gli elettrodi,

anche della **distribuzione delle resistività nel corpo investigato**: di conseguenza al valore di  $\rho$  calcolato mediante l'espressione sopra scritta viene dato il nome di *resistività apparente* e può essere pensato come la resistività di un mezzo omogeneo e isotropo che, energizzato con la stessa corrente, dia luogo alla stessa differenza di potenziale tra gli elettrodi.

Al variare della posizione degli elettrodi rispetto alle zone a diversa resistività presenti, la resistività apparente varia, indicando la presenza di tali disomogeneità: obiettivo dell'ERT è dunque quello di ricostruire al meglio forma, posizione e resistività (reale) delle diverse litologie sepolte a partire da numerose misure di resistività apparente (in dipendenza dal numero di elettrodi disposti sul terreno e dal tipo di quadripolo, da molte centinaia a migliaia).

Alla fase di acquisizione delle misure di resistività apparente segue quella di interpretazione delle stesse, in gergo tecnico si parla di *inversione*, tecnica che prevede il simultaneo ricorso ad algoritmi di modellazione numerica agli Elementi Finiti (o alle Differenze Finite) e a metodologie di ottimizzazione ai Minimi Quadrati.

La procedura (iterativa) di risoluzione consente dunque di arrivare ad una stima della distribuzione delle resistività reali nel mezzo investigato che si traduce in una immagine grafica di intuitiva ed efficace comprensione del tipo di quella riportata nelle figure seguenti 10 e 11:

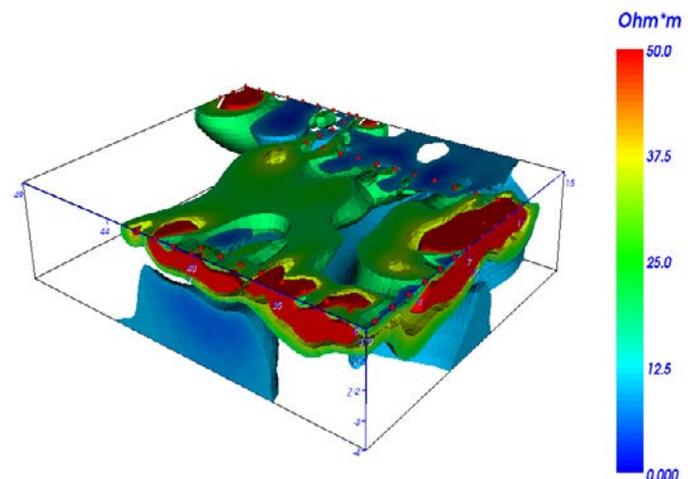
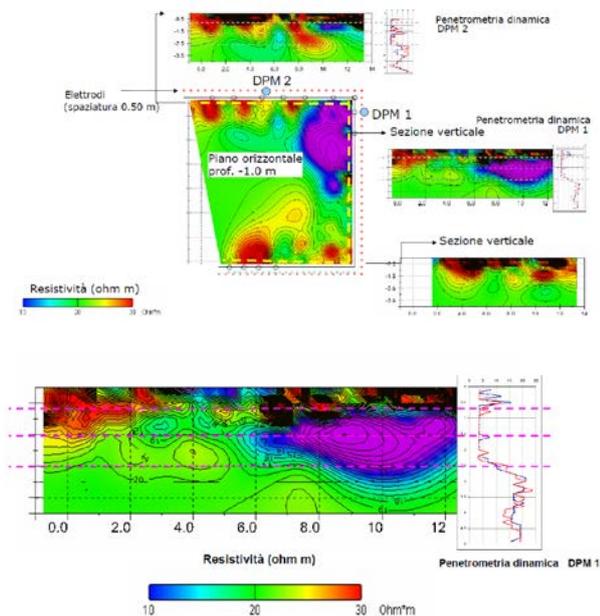


Figura 10 – rappresentazione 3D della distribuzione di resistività  $\rho$  di un terreno di fondazione (Geosec, 2009).



**Figura 11** – in colore viola: rappresentazione ERT di una perdita fognaria sotto ad una abitazione residenziale. (Fischanger, Occhi. 2007 - SAGEEP).

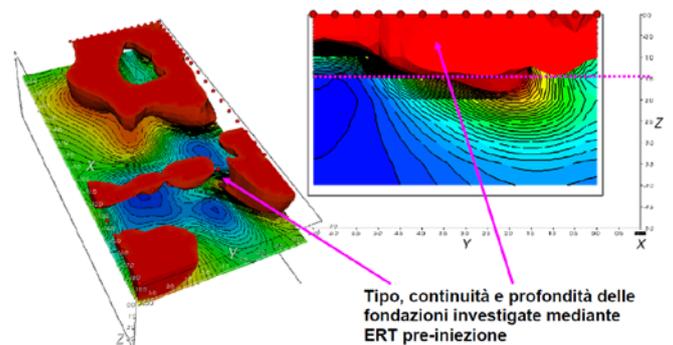
Più semplicemente possiamo affermare che per ottenere un'immagine come quelle in figura 10 e 11 è necessario immettere nel terreno una corrente continua in più punti.

Grazie poi agli elettrodi opportunamente posizionati sul terreno investigato, si ottiene la distribuzione della resistività del mezzo attraversato dalla corrente, che, ovviamente, varia in funzione delle sue caratteristiche fisico chimiche naturali.

Tutti i dati ottenuti (resistività apparenti) servono a costruire un modello matematico che permette di restituire un'immagine 3D del terreno in cui viene compiuta l'investigazione, immagine nella quale, grazie ad una scala cromatica predefinita, si possono identificare volumi omogenei che si riconoscono nel medesimo valore di resistività e che corrispondono ad una precisa informazione qualitativa.

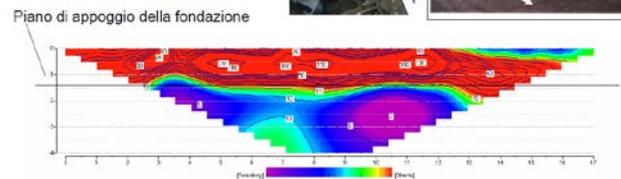
Sono infatti stabilite e condivise nella letteratura tecnica delle "forbici" di valori di resistività che rappresentano qualitativamente la natura del mezzo investigato per i vari tipi di litologie naturali, minerali e metalli, materiali da costruzione (calcestruzzi, laterizi etc.). In base quindi alla distribuzione spaziale della resistività è possibile individuare secondo le scale cromatiche di fig. 10 e 11, i volumi di terreno con presenza d'acqua (colore azzurro tendente al blu), terreni perdite di impianti di raccolta acque di scarico

(colore viola) figura 11. Tipo, continuità e profondità delle fondazioni investigate sono invece ben rappresentate in figura 12:



a)

Z = -150 cm



b)

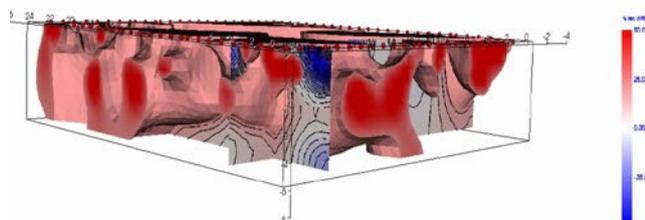
**Figura 12 (a,b)** – in colore rosso: a) rappresentazione 3D di una struttura di fondazione. b) sezione 2D prossima a fondazione continua di un edificio residenziale che mostra sviluppo orizzontale e profondità della struttura (Geosec, 2008. Cantiere in Bologna).

Ad ogni colore nell'immagine infatti è attribuito, secondo la scala cromatica riportata, un valore di resistività stimato.

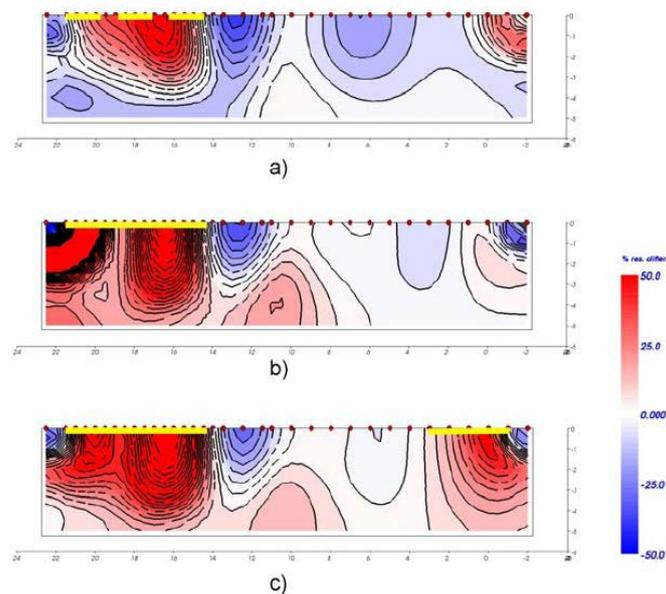
Nella fase di supporto all'iniezione invece, l'unico vero obiettivo della E.R.T. è quello di rilevare (attraverso lo studio della variazione percentuale della resistività elettrica) ben altre informazioni quali ad esempio il posizionamento della resina (ossia se essa si è effettivamente collocata nelle macro cavità da riempire, o piuttosto l'effettivo allontanamento o riduzione dell'acqua interstiziale presente nel terreno in cui si interviene (come ad es. avviene nei terreni

“argillosi”). Come in precedenza, il ricorso ad algoritmi di modellazione numerica dei valori di resistività apparente misurati in corso d’opera durante le iniezioni, permette di ottenere una immagine 3D della distribuzione delle resistività reali in quel momento sotto alla costruzione. Questo sistema diagnostico permette di poter confrontare - in piena operatività di lavoro - l’immagine precedente ad un’iniezione con quella durante e/o al termine della stessa iniezione, consentendo quindi al tecnico di visualizzare in un’unica immagine finale (cfr. figure 13 e 14) le differenze di resistività ottenute grazie alla resina iniettata. Anche in questo caso, può aiutare a comprendere quanto sin qui esposto, il riferimento alla solita scala cromatica, più semplificata della precedente, ove questa volta in colore rosso sono indicati quei volumi di terreno che hanno visto incrementare la loro resistività ( $\Delta\%$ , ossia la variazione % di resistività).

in particolare la figura 14 mostra la variazione di resistività in conseguenza di due sequenze di iniezione. La prima sul lato sinistro a partire da sinistra verso destra e la seconda iniezione puntuale sul lato estremo destro. Appare quindi intuitivo che laddove ad esempio un terreno con bassa resistività per la marcata presenza d’acqua, ottiene grazie alle iniezioni espandenti un incremento della sua resistività (colore rosso) vorrà significare che esso ha ridotto il suo contenuto d’acqua e si sta man mano drenando. Le diminuzioni di resistività ( $-\rho\Delta\%$ ) invece evidenziano proprio quei volumi di terreno che, in seguito alle iniezioni, hanno accolto flussi di acqua interstiziale spinti dall’espansione delle resine verso punti di minor energia. Appare ovvio che in una logica di progetto della sequenza di iniezioni, queste informazioni possono essere molto utili per spiazzare l’acqua dal volume significativo del terreno che sostiene l’edificio (Fischanger, Morelli, Douglas, Occhi 2007 - SAGEEP, USA).



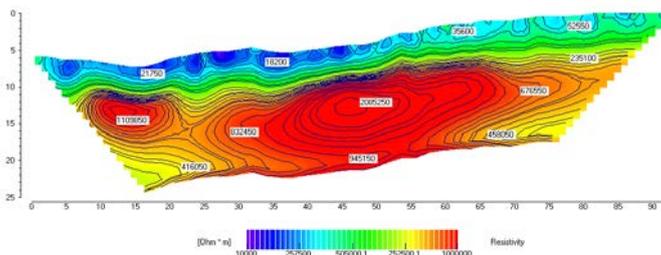
**Figura 13** – rappresentazione 3D della variazione % di resistività ( $\rho\Delta\%$ ) > 30% post trattamento di iniezione. (Fischanger, Morelli, Douglas, Occhi 2007).



**Figura 14** – rappresentazione 2D della variazione % di resistività ( $\rho\Delta\%$ ) durante due sequenze di iniezioni, la prima da sinistra e la seconda puntuale al lato destro. (Fischanger, Morelli, Douglas, Occhi 2007).

## 10. Approcci interpretativi della tomografia elettrica

È con lo sviluppo della tomografia elettrica 2D che l’interpretazione delle misure elettriche si avvia ad essere quella che oggi conosciamo, grazie anche allo sviluppo di algoritmi di modellazione agli Elementi Finiti che hanno reso possibile definire e con ottima risoluzione, la distribuzione della resistività elettrica nel sottosuolo, come nella immagine rappresentata nelle figure 10,11,12 precedenti e 15 seguente.



**Figura 15** – sezione 2D della Tomografia elettrica (Geosec, 2006).

L'interpretazione delle misure acquisite in cantiere avviene attraverso una tecnica di risoluzione denominata inversione. L'inversione è l'approccio matematico che porta alla determinazione della distribuzione della resistività nel sottosuolo a partire dalle misure di resistività elettrica di cantiere.

Ciò avviene attraverso la modellazione agli Elementi Finiti del terreno sottoposto ad indagine attraverso un sistema discreto di blocchi a resistività costante (risoluzione del problema diretto o forward problem). L'utilizzo poi di algoritmi iterativi di ottimizzazione ai minimi quadrati consente di risalire dalle misure di resistività apparente al modello che meglio riproduce la distribuzione di resistività del sottosuolo.

Nella figura seguente sono schematizzati i due problemi interpretativi delle misure geofisiche, il problema diretto e quello inverso.

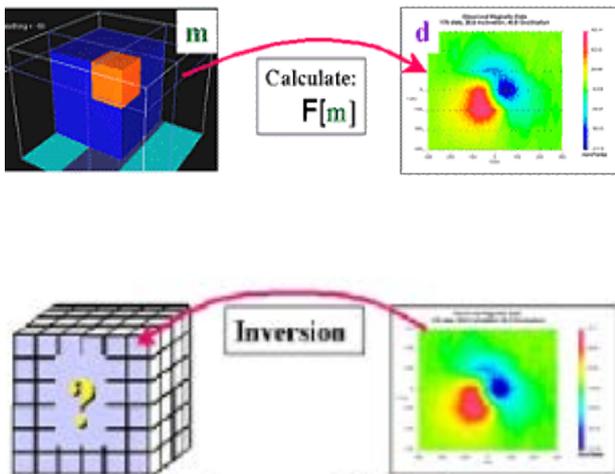


Figura 16 – problema diretto e problema inverso. (fonte:<http://www.eos.ubc.ca/ubcgif/iag/tutorials/invn-concepts/how.htm>)

Il diagramma di flusso della procedura risolutiva che sta dietro all'inversione può essere rappresentato in questo modo:



Figura 17 – procedura risolutiva dell'inversione (Morelli et al., 2006).

Con l'avvento della tomografia tridimensionale poi, cadono le limitazioni che impongono di ipotizzare un "mondo 2D" in cui le caratteristiche topografiche e geologiche si devono presumere costanti nella terza dimensione dello spazio.

L'inversione è ora condotta su mesh tridimensionali, come quella rappresentata nella figura seguente, che riescono a tener conto di tutti gli aspetti di variabilità spaziale del parametro fisico investigato.

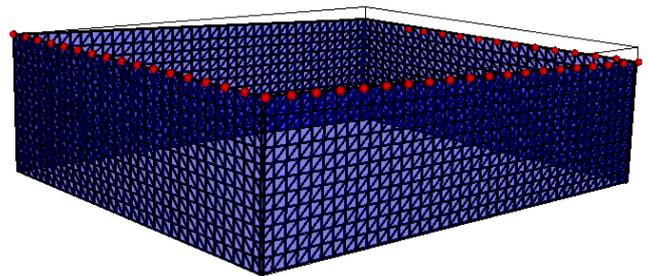


Figura 18 – inversione a mesh 3D (Morelli, Fischanger, 2008).

Un ulteriore sviluppo della tomografia elettrica degli ultimissimi anni è quello che ha reso disponibile, accanto alle consuete geometrie che utilizzano griglie 3D di elettrodi superficiali, l'impiego di innovative geometrie che trovano applicazione più idonea al contesto di intervento e tali da permettere impianti

mini invasivi senza necessità di scavi e demolizioni. Geometrie che permettono di poter indagare con analoga precisione anche lontano dagli stendimenti di elettrodi in punti del terreno coperti dal fabbricato, ove sarebbe impossibile effettuare prove meccaniche dirette senza disagio per le opere e gli occupanti. Tra queste geometrie si devono menzionare in particolare le configurazioni superficiali che fanno uso di disposizioni elettrodiche a forma di L, U o anulari (loop di elettrodi).

Lo stendimento elettrodico si sviluppa vantaggiosamente lungo i confini perimetrali dell'edificio e gli elettrodi possono avere spaziature variabili. di seguito alcune delle geometrie più comuni utilizzate dalla Geosec nell'ambito dei suoi trattamenti del terreno (Fischanger, Occhi 2009. V congresso Regionale dei Geologi della Sicilia):

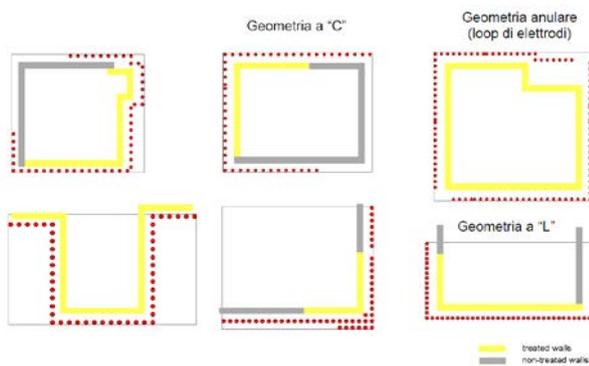


Figura 19 – geometrie di configurazioni superficiali con disposizioni elettrodiche dedicate alla struttura di edifici civili (Fischanger F. et Al., 2007 - SAGEEP).

Un altro grande ausilio al tecnico fornito degli strumenti di modellazione sopra descritti è quello reso disponibile dalla cosiddetta analisi di sensitivity dell'indagine, uno strumento che consente di verificare il grado di dettaglio e di risoluzione di ciascuna misura di resistività nel terreno.

L'analisi di sensitività ci permette di verificare che la risoluzione delle misure geoelettiche per geometrie ad L, C o anulari è molto buona anche in quelle regioni del terreno che si trovano lontano dallo stendimento elettrodico, come testimoniato dalle figure seguenti.

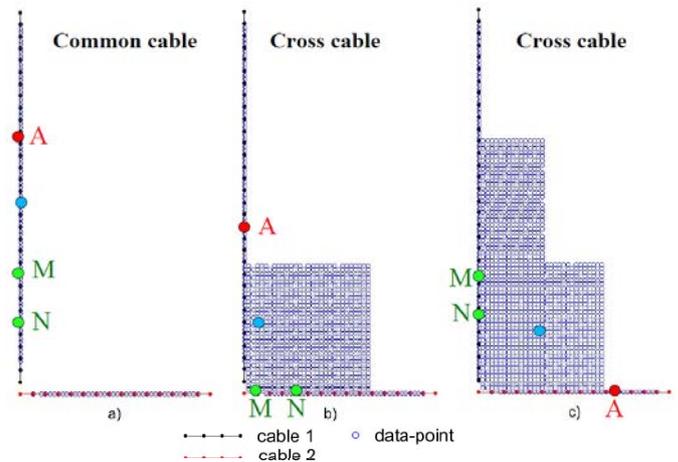


Figura 20 – Analisi della sensitività (Fischanger, 2008).

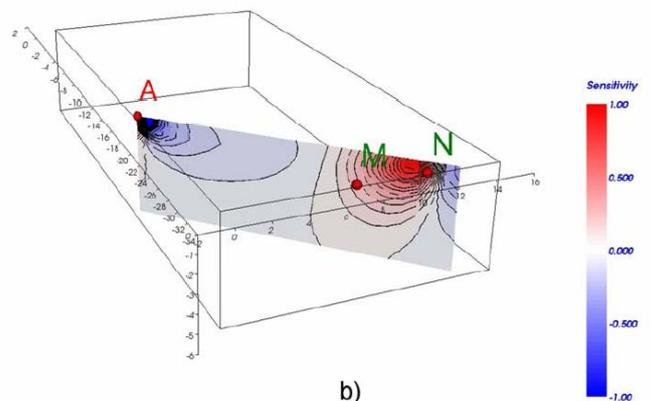


Figura 21 – Mappa verticale della sensitività per lo studio della profondità di investigazione (Fischanger, 2009).

## 11. La Tomografia Elettrica nella Caratterizzazione Geotecnica

Una delle prime applicazioni della tomografia elettrica in ambito geotecnico risale già al 1989 quando in seguito al terremoto del 19 e 10 settembre del 1985 a Città del Messico fu deciso di avviare una estesa campagna di studi geofisici e geotecnici per la zonazione della geologia superficiale (Leon, 1989). Furono realizzati sondaggi elettrici verticali su un'area di 900 km<sup>2</sup> i cui risultati vennero correlati qualitativamente con gli esiti dei sondaggi meccanici e delle conoscenze geologiche, consentendo l'elaborazione di un dettagliato modello geologico - tecnico del sottosuolo. Sebbene non esista un legame diretto tra prove CPT e il parametro resistività elettrica, la ricerca è proseguita in questa direzione e McCarter e Desmazes, 1997 hanno valutato l'influenza del consolidamento del terreno, effettuato per mezzo di un dispositivo per test di compressione, sulle misure di conducibilità elettrica mostrando che la variazione della porosità dovuta alle tensioni efficaci, è effettivamente molto simile ai cambiamenti misurati sulla conducibilità elettrica al variare delle tensioni efficaci.

I risultati mostrerebbero come le misure elettriche possano essere utilizzate per valutare il grado di consolidamento dei terreni e, in particolare, si è osservato che le misure di conducibilità elettrica possano prevedere con precisione lo stato tensionale iniziale. Endres e Clement, 1998 hanno confrontato misure in sito della permittività elettrica e della resistività elettrica con coincidenti profili CPT.

I risultati hanno mostrato una relazione lineare tra dati CPT, permittività, resistività al variare tra litologie argillose a sabbiose e che il rapporto tra permittività e il logaritmo della resistività offre un valido coefficiente per la classificazione dei terreni soprattutto quando altri fattori, come la posizione relativa alla tavola di acqua e la stratigrafia, sono stati utilizzati per affinare l'analisi dei dati.

Braga et al., 1999 hanno confrontato i valori di resistività, resistenza trasversale, conduttanza longitudinale e caricabilità determinati per mezzo dei sondaggi elettrici verticali al numero di colpi ottenuti con prove standard penetration test.

In particolare si osservò una buona correlazione tra resistività, conduttanza longitudinale e prova Spt, in terreni argillosi, ghiaioso - sabbiosi e sabbiosi. Nel 2003 Gao et al., hanno misurato prima con prove in situ e poi in laboratorio la resistività elettrica delle argille correlandole a: contenuto d'acqua, indice di

plasticità, peso specifico, salinità, contenuto organico. Per le argille osservate soltanto il parametro di salinità ha mostrato una chiara relazione con la resistività elettrica. Cosenza et al., 2006 a partire da una valida correlazione qualitativa tra valori di resistività ottenuti attraverso misure di tomografia elettrica a sondaggi elettrici verticali, e prove penetrometriche dinamiche hanno impostato correlazioni quantitative tra i valori di resistenza alla punta e quelli di resistività elettrica estratti dalle tomografie nei punti corrispondenti alle prove penetrometriche e i valori ottenuti dai SEV.

In entrambi i casi si osservò che le coppie di valori associati ( $R_{ho}$ ,  $Q_c$ ) agli strati in cui non erano presenti granulometrie grossolane costituivano distinte popolazioni delineando definiti range di variazione.

Soupios et al., 2007 e 2008, Sultan e Santos, 2008, discutono l'utilizzo dell'integrazione qualitativa tra la tomografia elettrica, carotaggi e prove SPT per la caratterizzazione dei terreni di fondazione. Nell'ambito di uno studio finalizzato alla valutazione dell'efficienza dei terreni di riempimento di una diga per il contenimento delle infiltrazioni e delle perdite della riserva Oh e Sun, 2008 hanno recentemente valutato la correlazione tra numero di colpi ricavato dalle prove SPT con i valori di resistività elettrica, ottenuti per mezzo della tomografia elettrica, e le analisi granulometriche. I risultati hanno evidenziato che generalmente ai volumi di terreno in cui sono misurati bassi valori di resistività elettrica corrisponde anche un basso numero di colpi SPT e viceversa.

Si è osservato inoltre che in alcune regioni dove il valore della resistività è alto, il valore di N SPT risulta molto basso.

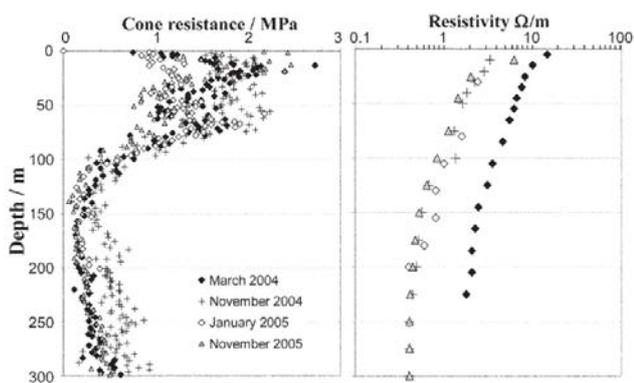
Tale risultato viene spiegato dagli autori con la diminuzione della componente più fine nella matrice. Questa ipotesi ben si allinea con i risultati di precedenti prove sperimentali (Bergstrom, 1997) e con l'analisi granulometrica effettuata.

Sempre nel 2008 Pasetti et al. hanno sviluppato la ricerca di una relazione intermedia per uno specifico materiale tra una proprietà fisica correlata certamente per un verso con la resistenza meccanica e per un altro verso con la resistività elettrica, su campioni di calcestruzzo, di composizione nota e di resistenza meccanica nota, è stato coronato da promettente successo. Sudha et al., 2009 hanno applicato la tomografia di resistività elettrica, le prove geotecniche di tipo SPT e DCPT, allo studio dei terreni per la costruzione di una centrale termica.

Nell'ambito di questo progetto hanno correlato la resistenza trasversale al numero di colpi ottenuto dalle prove geotecniche. I risultati ottenuti sono

ovviamente specifici per i siti indagati, ma mostrano una evidente correlazione lineare tra la resistenza trasversale e il numero di colpi SPT e DCPT ottenuti dalle prove in situ.

Bernard et al., 2009 hanno condotto uno studio riguardo la caratterizzazione dei terreni contenenti elevata frazione argillosa proponendo un metodo basato sulla misura della resistenza alla punta e della resistività elettrica per mezzo di un penetrometro e salinometro. Quest'ultimo è infatti costituito da un cilindro in PVC sul quale sono stati installati 4 elettrodi circolari secondo il quadrupolo Wenner. Lo studio ha mostrato dettagliatamente interessanti relazioni tra i parametri di resistenza alla punta, resistività elettrica, contenuto d'acqua e porosità e ha mostrato la bontà della correlazione tra resistività elettrica e resistenza alla punta del penetrometro.



**Figura 22** – Confronto tra la variazione della resistenza alla punta e della resistività elettrica con la profondità in campioni di terreno argillosi (Bernard et al., 2009)

Nel 2010 Boadu e Nimo hanno esaminato l'influenza dei parametri petrofisici e geotecnici su parametri elettrici determinati con misure di resistività elettrica complessa. I parametri elettrici e geotecnici sono stati misurati su 32 campioni di terreno di differente tessitura e composizione.

I risultati ottenuti descrivono l'influenza del contenuto di fini, del rapporto tra i vuoti, della dimensione dei pori, della superficie specifica sul parametro della resistività elettrica.

Sono infine recentissimi i lavori riguardanti l'utilizzo della tomografia della resistività elettrica applicata allo studio della stabilizzazione dei terreni (Dahlin et al., 1999, Farooq et al., 2007, Schueremans et al., 2003) anche per mezzo di iniezioni di resine espandenti

(Fischanger et al., 2007, Rittgers et al., 2010) a cui daremo seguito nel prosieguo con apposita trattazione.

## Bibliografia

- Bergstrom J., 1998.** Geophysical methods for investigating and monitoring the integrity of sealing layer on mining waste deposits. Licentiate Thesis, Lulea University of Technology, Lulea, Sweden;
- Bernard U. M., Dudoignon P., Pons Y., 2009.** Characterization of Structural Profiles in Clay-Rich Marsh Soils by Cone Resistance and Resistivity Measurements. SSSAJ: Volume 73: Number 1, January–February, doi:10.2136/sssaj2007.0347;
- Boadu F. K. and Owusu-Nimo F., 2010.** Influence of petrophysical and geotechnical engineering properties on the electrical response of unconsolidated earth materials. Geophysics, Vol. 75, N. 3 May-June 2010; P. g21–G29, 8 Figs., 1Table, 10.1190/1.3374465;
- Braga A., Malagutti W., Dourado J. and Change H., 1999.** Correlation of electrical resistivity and induced polarization data with geotechnical survey standard penetration test measurements. J. Environ. Eng. Geophys. 4, 123–30;
- Cosenza P., Marmet E., Rejiba F., Cui Y. J., Tabbagh A. and Charley Y., 2006.** Correlation between geotechnical and electrical data: a case study at Garchy in France. J. Appl. Geophys. 60, 165–78;
- Dahlin, T., Svensson, M., Lindh, P., 1999.** DC resistivity and SASW for validation of efficiency in soil stabilisation prior to road construction, Proceedings of 5th Meeting of the European Association for Environmental and Engineering Geophysics, 5-9 September 1999, Budapest, Ls5, 2p;
- Endres A. L. and Clement W. P., 1998.** Relating cone penetrometer test information to geophysical data: a case study. Symp. Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems (SAGEEP98) (Chicago, USA);
- Farooq M., Kim J.H., Park S., Song Y.S., 2007.** Non-destructive evaluation of cement-grout by surface electrical resistivity method. Advanced Nondestructive Evaluation II, Volume 1, pp 599-604. DOI No: 10.1142/9789812790194\_0097.
- Fischanger, F., Occhi, M. 2009.** La tomografia elettrica 3D nei consolidamenti del terreno con resine espandenti, V Congresso Regionale dei Geologi Regione Sicilia, Palermo (Italy), 26 - 27 Giugno, 2009.

**Giao P. H., Chung S. G., Kim D. Y. and Tanaka H., 2003.** Electrical imaging and laboratory resistivity testing for geotechnical investigation of Pusan clay deposits. *J. Appl. Geophys.* 52, 157–75;

**Fischanger, F., Morelli, G., LaBrecque, D. and Occhi, M. 2007.** Monitoring resin injections with 3d Electrical Resistivity Tomography (ERT) using surface and multi-borehole electrode arrays. *Proceedings of Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems (SAGEEP)*, Denver, Colorado (USA), April 1-5, 2007, 1226-1233.

**Leon M.B., 1989.** Subsoil zoning of Mexico City using qualitative relationships between soil strength and electrical resistivity. *International Journal of Mining and Geological Engineering*, 7, 59-68;

**McCarter, W.J. and Desmazes, P., 1997.** Soil Characterization using Electrical Measurements. *Geotechnique*, Vol. 47, No.1, pp. 179-183;

**Oh S. and Sun C., 2008.** Combined analysis of electrical resistivity and geotechnical SPT blow counts for the safety assessment of fill dam. *Environ Geol* ( ) 54:31–42 DOI 10.1007/s00254-007-0790-y;

**Pasetti L., Bet P., Bonifazzi C., Santarato G. and Tralli S., 2008.** Critical analysis of physical parameters for the characterization of the quality of concrete samples. *Proceedings of the 1<sup>st</sup> international RILEM Conference “On Site Assessment of Concrete, Masonry and Timber Structures” SACoMaTIS 2008*, Varenna (Italy), 1-2 Settembre 2008, pp. 69-78, ISBN 978-2-35158-061-5.

**Rittgers, J.B., Sirls, P., Morelli, G. and Occhi, M., 2010.** Case history: Monitoring resin injections with the aid of 4D geophysics. *Proceedings of Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems (SAGEEP)*, Keystone, Colorado (USA), April 11-15, 2010, 379-390.

**Schueremans L., Van Rickstal F., Verderickx K., Van Gemert D., 2003.** Evaluation of masonry consolidation by geo-electrical relative difference resistivity mapping. *RILEM Materials & Structures* 36, 46-50.

**Soupios P. M., Georgakopoulos P., Papadopoulos N., Saltas V., Andeakakis A., Vallianatos F., Sarris A. and Makris J. P., 2007.** Use of engineering geophysics to investigate a site for a building foundation. *J. Geophys. Eng.* 4, 94–103;

**Santarato, G., Ranieri, G., Occhi, M., Morelli, G., Fischanger, F., Gualerzi, D., 2011.** Three-dimensional Electrical Resistivity Tomography to control the injection of expanding resins for the treatment and stabilization of foundation soils, *Engineering Geology* (2011), doi:10.1016/j.enggeo.2011.01.009

**Soupios P. M., Loupasakis C., Vallianatos F., 2008.** Reconstructing former urban environments by combining geophysical electrical methods and geotechnical investigations - an example from Chania, Greece. *J. Geophys. Eng.*, Vol. 5, No. 2., 186;

**Sudha K., Israil M., Mittal S., Rai J., 2009.** Soil characterization using electrical resistivity tomography and geotechnical investigations. *Journal of Applied Geophysics* 67, 74–79;

**Sultan S. A., Monteiro Santos F. A. and Helal A., 2006.** A study of the groundwater seepage at Hibis Temple using geoelectrical data, Kharga Oasis, Egypt. *Near Surf. Geophys.* 347–54;

#### immagini nel quaderno:

**Figura 8** – Georesistivimetro Syscal R1 Plus (<http://www.resistivity-meters.com/>).

**Figura 13** – problema diretto e problema inverso, (<http://www.eos.ubc.ca/ubcgif/iag/tutorials/invn-concepts/how.htm>)

**Figura 22** – Bernard et al., 2009.

Alcune delle elaborazioni grafiche di tomografia elettrica mostrate in questo quaderno sono state ottenute con il software ERT Lab GEOSEC 1.0, prodotto in esclusiva per Geosec srl dalla Geostudi Astier srl, nella versione customizzata al consolidamento dei terreni con iniezione di resine espandenti.



III<sup>a</sup> Edizione Agosto 2011  
Copyright Geosec © All Right Reserved

GEOSEC®  
Via Giuseppe Di Vittorio, 41/B  
Lemignano di Collecchio 43044 (PR)  
tel. 0039 0521 339323  
fax 0039 0521 804772  
e-mail: info@geosec.it  
www.geosecgroup.com



SEDE: Via Giuseppe Di Vittorio 41/B  
Lemignano di Collecchio 43044 (Parma)

Tel: 0521 339323 - Fax: 0521 804772  
info@geosec.it



[www.geosec.it](http://www.geosec.it)