

I quaderni del consolidamento del terreno con resine espandenti

GEOSEC



CONSOLIDAMENTO
DEL TERRENO
CON RESINA
ESPANDENTE:
VALUTAZIONE
DELL'EFFICIENZA

 **GEOSEC**

NUMERO

5

CONSOLIDAMENTO DEL TERRENO CON RESINA ESPANDENTE: VALUTAZIONE DELL'EFFICIENZA.

Marco OCCHI¹

1 GEOSEC group - Italy

Introduzione

Tecniche di consolidamento di terreni mediante iniezioni di resine espandenti sono utilizzate con buon successo, quando le cause di cedimento differenziale verticale delle strutture di fondazione sono connesse ad alterazioni naturali e/o antropiche del terreno di fondazione e/o a una non corretta progettazione/esecuzione dell'opera.

Tra le diverse tecniche di consolidamento dei terreni mediante iniezioni di resine espandenti, è stato ideato da Geosec un procedimento che prevede, in abbinamento alle tradizionali prove geotecniche, l'applicazione di metodi geofisici, in particolare della tomografia di resistività elettrica 3D/4D, per poter acquisire, anche nei volumi di terreno difficilmente accessibili e posti al di sotto di fabbricati, quelle informazioni necessarie al progetto del consolidamento e al suo successivo monitoraggio in corso d'opera. E' secondo questo approccio di intervento, e con modalità del tutto simili alle condizioni ordinarie di cantiere, che vengono presentati in questo quaderno i risultati ottenuti in un campo prove a vera grandezza, interessato da trattamento di miglioramento mediante iniezioni di resina espandente poliuretana bi-componente.

1. Il Consolidamento dei Terreni con Resine

L'applicazione di tecniche di consolidamento del terreno con resine espandenti ha riscontrato un forte incremento di successo negli ultimi anni, soprattutto a seguito dello sviluppo di nuovi materiali e metodologie

appositamente studiati per questo campo specifico di applicazione. I primi interventi risalgono infatti già alla seconda metà degli anni cinquanta negli Stati Uniti per il riempimento di cavità e per il sollevamento di strutture di fondazione, solo successivamente negli anni novanta in Europa dapprima per il sollevamento delle pavimentazioni depresse e successivamente per il consolidamento delle fondazioni. Oggi sono disponibili sul mercato diverse applicazioni differenti per prodotto di iniezione e criteri di progetto, posa e verifica finale. Tra quelle note e più diffuse ricordiamo le tecniche di consolidamento mediante iniezione a *diffusione libera* di resina nel terreno e quelle *miste*, che abbinano la resina iniettata nel terreno ad un elemento strutturale portante collegato alla fondazione esistente per il trasferimento del carico più in profondità. L'interesse suscitato da questo tipo d'intervento è dovuto all'estrema efficienza del trattamento che risulta risolutivo anche a lungo termine. Si tratta inoltre di un intervento poco invasivo, di cui è garantita la massima compatibilità ambientale, nel quaderno 4 della collana sono riportate le risultanze dei test secondo le norme vigenti. Non sono infine da sottovalutare alcuni aspetti pratici che riconoscono alla tecnica evidenti vantaggi se paragonata alle soluzioni tradizionali come la rapidità, l'assenza di vibrazioni, la flessibilità dell'intervento e la possibilità di operare in qualunque spazio con mezzi poco ingombranti. La finalità delle tecniche di consolidamento con resine espandenti è quella di eliminare le cause dei cedimenti delle fondazioni attraverso l'iniezione nel terreno di un materiale polimerico espandente eco compatibile. I trattamenti di iniezione sono rivolti a risolvere tutte quelle problematiche che implicano cedimento differenziale verticale con abbassamento del terreno e conseguente danneggiamento di edifici e strutture. I cedimenti del terreno sono spesso dovuti a periodi di

siccità alternati a prolungate precipitazioni, perdite fognarie, vibrazioni da traffico veicolare intenso e limitrofo, scavi nelle vicinanze dell'edificio, crescita di radici di piante ad alto fusto e variazione del carico applicato in fondazione. L'interazione tra acqua e terreno è sicuramente uno dei meccanismi più importanti ed è un fattore critico per tutti i tipi di terreno. I terreni argillosi infatti hanno la capacità di assorbire grandi quantità d'acqua che porta ad un considerevole aumento di volume. Al contrario, la perdita d'acqua si traduce in una diminuzione del volume del terreno. Se a periodi caratterizzati da abbondanti e prolungate precipitazioni si alternano periodi di siccità, il terreno subisce cicli di aumento e diminuzione di volume che portano alla creazione di vuoti e quindi a possibili cedimenti differenziali. Nei terreni granulari invece, la permeabilità è maggiore e l'acqua circola liberamente con eventuale trasporto di particelle fini. Un'intensa circolazione idrica nel sottosuolo può quindi progressivamente portare alla creazione di vuoti e cavità, spesso concausa dei cedimenti. Per maggiori approfondimenti si rimanda al quaderno 3 della collana.

2. La Tecnica di Intervento

Nello specifico la tecnica GEOSEC di consolidamento con resina espandente (figura 2) prevede di iniettare il materiale polimerico nei volumi di terreno interessati dal cedimento differenziale verticale. Le proprietà intrinseche della resina rivestono, ovviamente, grande importanza. Dopo l'iniezione, infatti, la resina si espande rapidamente e già dopo 20, 30 secondi dal contatto con il terreno per reazione chimica esotermica, contrastando in maniera attiva il cedimento. L'effetto osservato è triplice (figura 1):

- riempimento di vuoti;
- compattazione;
- riduzione dell'acqua interstiziale.



Figura 1 – Terreno consolidato con resina.

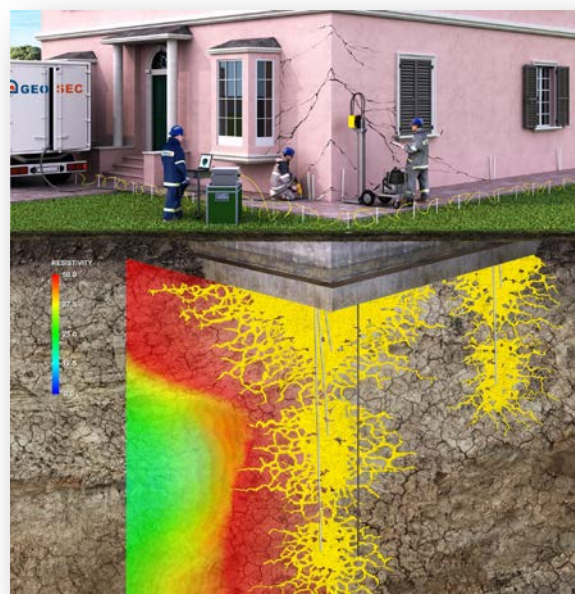


Figura 2 – Ricostruzione schematica di un intervento di consolidamento con tecnica GEOSEC. Sempre sotto il controllo dell'indagine di tomografia della resistività elettrica E.R.T. eseguita in time lapse sul terreno posto sotto all'impronta del fabbricato. Sono indagati sia i volumi di terreno cedevoli che stabili e il trattamento prosegue fino a quando non è raggiunta una omogeneità tra le zone cedute e quelle non cedute prese a riferimento (brevetto EP1914350).

La resina viene dunque iniettata secondo le risultanze diagnostiche in corso d'opera e direttamente nei punti di interesse mediante tubi di piccolo diametro (max 2,5 - 3 cm). Quantità e formulazione della resina variano in funzione della tipologia di problema come dalle risultanze diagnostiche geofisiche e geotecniche ottenute prima e durante le iniezioni dal Geologo / ingegnere GEOSEC sempre presente sul luogo dell'intervento. Infatti è proprio grazie agli effetti osservati in corso d'opera durante le iniezioni, con il continuo monitoraggio dell'intervento, che si possono adeguare i quantitativi di resina, la geometria e la sequenza delle iniezioni secondo le effettive risposte del terreno. Poiché la forza espandente della resina è funzione sia dell'entità dei vuoti presenti nel terreno e della sua permeabilità, così come della propria reazione chimica, quindi della sua formulazione, e non della pressione di iniezione alla pompa, in alcuni contesti (per esempio in terreni che presentano significative concentrazioni di acqua) sorge il rischio di generare un'eccessiva pressione, che può portare alla

fratturazione del terreno o ad un suo rigonfiamento con conseguente innalzamento anomalo della fondazione. Al contrario, un quantitativo insufficiente di materiale non garantisce il riempimento dei vuoti e non contribuisce al consolidamento finale del terreno. La fase di progettazione dell'intervento risulta quindi essere tanto delicata quanto fondamentale. Essa deve prevedere:

- definizione del problema, con identificazione delle possibili cause del dissesto;
- deduzione del modello geologico e geotecnico del terreno;
- definizione del tipo di intervento;
- controllo dell'efficacia dell'intervento in corso d'opera.

Questa sequenza metodologica è, nella tecnica di intervento di Geosec, supportata dall'indagine geofisica di tomografia della resistività elettrica tridimensionale, svolta sia in fase di progettazione, sia nel corso dell'esecuzione, proprio per permettere di ottenere un'immagine del sottosuolo nel corso di tutte le fasi di lavorazione. Durante la fase conoscitiva, infatti, la tomografia è di supporto nell'individuazione delle possibili cause o concause del dissesto, come la presenza di cavità nel sottosuolo o eventuali ristagni d'acqua. Inoltre serve per comprendere le condizioni dei volumi di terreno limitrofi e non soggetti a cedimento da prendere a riferimento nel successivo trattamento. Nel corso delle iniezioni questo strumento è in grado di distinguere efficacemente il riempimento dei vuoti e l'allontanamento dell'acqua interstiziale dal volume di terreno in corso di trattamento.

Gli strumenti propri della tecnica di iniezione sono dunque sempre affiancati da criteri e sistemi di controllo e monitoraggio dell'intervento: oltre alla già citata tomografia della resistività elettrica, anche prove geotecniche di resistenza e deformabilità rivestono grande importanza. Alle prove penetrometriche poi, eseguite prima e dopo l'intervento, è affidata la valutazione degli effettivi incrementi di resistenza a seguito dell'iniezione.

Ricordiamo infine che anche un'adeguata esperienza professionale sul campo, arricchita da una significativa capacità di osservazione dei fenomeni in atto, gioca un ruolo non indifferente nella gestione dell'intervento. Ecco perché Geosec affida ogni suo intervento alle competenze di un geologo / ingegnere specializzato.

Lo scopo di questo quaderno così come dell'intera collana tecnica è quello di contribuire al miglioramento delle conoscenze nel campo, derivando

relazioni dirette tra le iniezioni e il miglioramento del terreno trattato e favorendo la comprensione dei meccanismi che portano a questi miglioramenti.

Per questo scopo GEOSEC ha allestito un campo prove in scala reale (figure 3, 4) per sottoporlo allo studio di diverse equipe di studiosi esterni e in cui si sono condotte indagini geotecniche in sito, prima e dopo il trattamento dei terreni con resina, associate a prove geotecniche di laboratorio effettuate su campioni di terreno "indisturbato" e su campioni di terreno che, in diversa misura, sono risultati interessati dal trattamento con le resine.



Figura 3 – Il campo prove - indagini di tomografia della resistività elettrica (2009, Geostudi Astier ITA).



Figura 4 – Il Campo prove di Collecchio (PR) durante i prelievi eseguiti dall'equipe dell'Università di Milano.

Concordemente alla pratica di cantiere, indagini geofisiche di tomografia della resistività elettrica tridimensionale sono state condotte al fine di acquisire, anche nei volumi di terreno difficilmente accessibili o in questo caso di specie non direttamente

testati dalle prove geotecniche, quelle informazioni che usualmente sono necessarie al progetto del consolidamento e al suo monitoraggio in corso d'opera.

Le caratteristiche di resistenza e deformabilità del terreno, precedenti e successive all'intervento, dedotte dalle indagini geotecniche sono state dunque confrontate con le risultanze delle indagini geofisiche.

3. La Resina Espandente

Le proprietà fisico chimiche della resina utilizzata denominata MAXIMA® sono raccolte nella rev. 2014 - quaderno n. 4. La resina ha considerevoli proprietà di resistenza alla compressione e buone capacità di resistenza a trazione e a flessione.

Prove di resistenza a compressione monoassiale condotte su campioni di resina costituiti a diverse densità (da 40 a 200 kN/m³) forniscono valori di resistenza compresi tra 133 e 2420 kN/m² (figura 5).

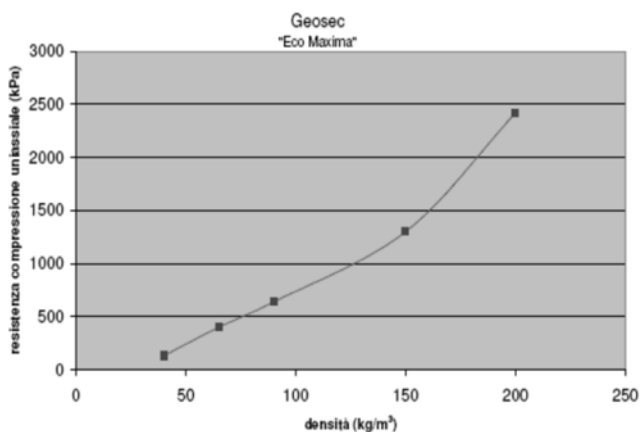


Figura 5 – Resistenza a compressione monoassiale di provini di resina Geosec Maxima, (valori medi su 6 provini,) determinati secondo norma UNI 6350-68.

4. Il Monitoraggio delle Iniezioni mediante Tomografia della Resistività Elettrica 4D

La tomografia della resistività elettrica tridimensionale (ERT 3D), adottata per il monitoraggio delle iniezioni, è una metodologia di indagine geofisica che consente la determinazione della distribuzione di resistività elettrica dei volumi di sottosuolo oggetto della prospezione. La tecnica ricorre alla misura dei

potenziali che conseguono all'immissione di una corrente continua nel terreno, consentendo di evidenziare variazioni litologiche, condizioni di diversa saturazione del terreno, cavità, strutture sepolte o altre anomalie, sulla base del differente comportamento resistivo di tali mezzi. Dal punto di vista interpretativo, per giungere dalle misure E.R.T. alla determinazione della distribuzione di resistività del sottosuolo, si ricorre a strategie di *inversione*, che prevedono la *discretizzazione* del dominio-terreno in blocchi (in genere esaedrici) e la risoluzione numerica delle equazioni differenziali, che descrivono il fenomeno, mediante tecniche agli Elementi Finiti, cui si associa l'utilizzo di algoritmi di ottimizzazione iterativi ai Minimi Quadrati (Morelli and La Brecque, 1996).

In virtù dell'estrema sensibilità della metodologia E.R.T. alle dinamiche dei fluidi nel sottosuolo, questa tecnica di indagine si presta bene al monitoraggio in corso d'opera del trattamento di iniezione. Il meccanismo di distribuzione nel terreno delle resine poliuretatiche (che rappresentano un mezzo ad alta resistività elettrica) normalmente prevede una diffusione di tipo dendritico: i filamenti di questo materiale non hanno dunque un impatto significativo sul flusso della corrente elettrica nel sottosuolo e le variazioni di resistività osservabili nel corso dell'intervento sono da attribuirsi all'effetto della rimozione di acqua interstiziale e al riempimento di vuoti, in seguito all'azione di compattazione dovuta all'espansione della resina.

Da questi presupposti si è sviluppata la tecnica integrata oggetto di brevetto Europeo EP1914350 che nella pratica di cantiere procede secondo l'approccio di seguito descritto (Fischanger et al., 2007 SAGEEP e Santarato et al. 2011 Engineering Geology), la metodologia è stata in seguito negli anni completata con la domanda di Brevetto EP 2543769 (2011).

1. Un'indagine ERT preliminare all'intervento di iniezione è sempre condotta per definire le condizioni iniziali dei terreni da sottoporre a consolidamento. La rappresentazione tridimensionale della distribuzione di resistività del sottosuolo, associata alle informazioni che provengono dalle prove geotecniche (penetrometrie o altro), consente una prima generica classificazione dei terreni. Inoltre la tomografia consente di descrivere, con maggiore o minore risoluzione a seconda dei casi, tipologia, continuità e profondità della fondazione, e mette in evidenza eventuali anomalie dovute alla presenza di vuoti, ritenzioni d'acqua o altri elementi litologici distintivi.

2. Le informazioni geofisiche preliminari vengono integrate con i dati geotecnici e strutturali disponibili (quadro fessurativo, geometria delle fondazioni, carichi) e concorrono alla progettazione di dettaglio dell'intervento: collocazione, numero, profondità dei fori di iniezione, quantitativo di resina da iniettare che nel brevetto EP1914350 prevedono il raggiungimento di una condizione omogenea a quella del terreno limitrofo non ceduto e preso a riferimento durante il trattamento.

3. Nel corso dell'intervento di iniezione, indagini ERT intermedie, eseguite utilizzando lo stesso stendimento elettrodico, progettato nella fase 1, vengono condotte con lo scopo di investigare lo stato di trattamento dei suoli ceduti e le variazioni dei fluidi presenti nel sottosuolo, in modo tale da poter riprogettare quasi in tempo reale il trattamento sulle base delle evidenze di cantiere e fino a quando le condizioni non saranno uniformi o simili o migliori dei volumi di terreno limitrofi non ceduti e presi come riferimento nel trattamento.

4. Al termine dell'intervento un ultimo rilievo ERT post-trattamento è condotto per verificare le condizioni finali dei suoli dopo il trattamento di consolidamento.

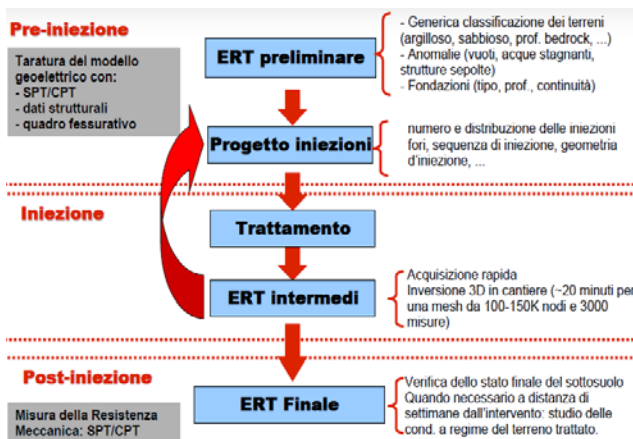


Figura 6 – procedura d'intervento Geosec (Fischanger F. et al. V congresso Regionale dei Geologi di Sicilia, Palermo 26-27 Giugno 2009).

4. Il Campo Prove

Per valutare il trattamento di consolidamento dei terreni di fondazione mediante iniezione di resine

espandenti è quindi stato approntato, grazie alla disponibilità di GEOSEC ed in collaborazione con il Prof. Ing. Gian Paolo GIANI e la Prof.ssa Geol. Tiziana APUANI dell'Università degli Studi di Milano, il Prof. Ing. Gaetano RANIERI dell'Università degli Studi di Cagliari, il Prof. Giovanni SANTARATO dell'Università degli Studi di Ferrara, l'ing. Gianfranco MORELLI e l'ing. Federico FISCHANGER della Geostudi Astier, un sito test in cui sono state eseguite prove geotecniche e geofisiche, prima e dopo la simulazione di un intervento, effettuato con modalità del tutto simili alla normale pratica di cantiere allo scopo di verificare l'efficienza dell'applicazione.

L'area di studio si trova a sud-ovest di Parma, nel comune di Collecchio, in posizione di avanfossa rispetto alla catena appenninica che si innalza immediatamente a sud della suddetta località e si sviluppa in direzione NW-SE cingendo così la parte meridionale della Pianura Padana.

Il sottosuolo è contraddistinto da un forte accumulo di sedimenti alluvionali quaternari che appoggiano in discordanza semplice sul substrato di sedimenti marini del Pliocene Superiore e del Pleistocene Inferiore.

Lo spessore di questi sedimenti si assottiglia marcatamente procedendo verso SW e raggiunge il suo spessore minimo in prossimità dell'abitato di Collecchio (figura 7).

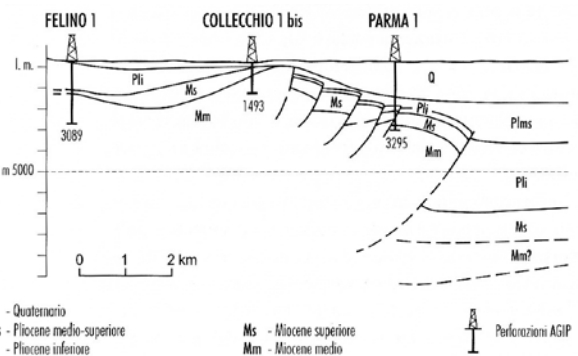


Figura 7 – Sezione del sottosuolo dell'asse Parma - Felino (fonte: AGIP).

In superficie la maggior parte del territorio è ricoperto da paleosuoli a diverso grado di evoluzione. Si tratta prevalentemente di limi e argille con locale presenza di ghiaie e sabbie che mediamente raggiungono la profondità di 3 metri, su conglomerati e ghiaie appartenenti alle unità descritte in precedenza (figura 8).

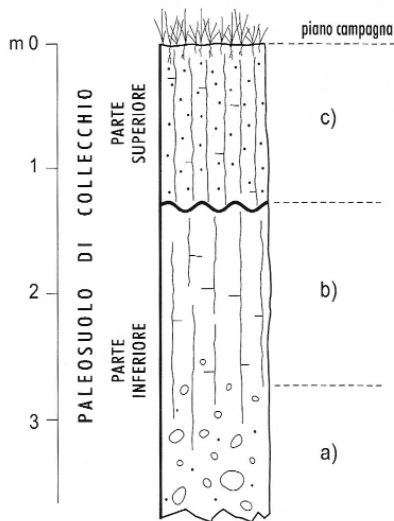


Figura 8 – Rappresentazione schematica dei diversi orizzonti costituenti il paleosuolo di Collecchio: a) ghiaie alterate, b) materiale limoso - argilloso giallo - rossastro, c) materiale limoso-argilloso giallo-rossastro con significato di loes (R. Gelati, Collecchio: una storia di alcuni milioni d'anni, 2004).

Il sito test è un campo destinato ad uso agricolo, oggi incolto. Nell'area investigata, di estensione $6 \times 12 \text{ m}^2$, si è scelto di isolare due porzioni quadrate attigue di 6 metri di lato ciascuna (Figura 9).

Nella prima porzione sono stati eseguiti i trattamenti di consolidamento, mentre nella seconda non è stato eseguito alcun tipo di trattamento.

Al fine di valutare le modifiche apportate dall'iniezione della resina al terreno, in entrambe le aree sono state eseguite prove di natura geotecnica e geofisica volte ad identificare il tipo di terreno ed i relativi parametri di resistenza e deformabilità. Il trattamento di consolidamento ha previsto l'esecuzione di 39 iniezioni, effettuate in gran parte alla profondità di 150 cm dal piano campagna (1° livello), lungo il perimetro dell'area $6 \times 6 \text{ m}^2$ interessata dal trattamento, con un interasse delle iniezioni di 1 metro.

Alcune ripetizioni dell'iniezione sul medesimo punto e verticale (2° livello) sono state eseguite alla profondità di 250 cm dal piano campagna. L'esecuzione delle indagini è stata compiuta in tre fasi successive.

Nella giornata dedicata al trattamento di consolidamento, sono state eseguite prove penetrometriche statiche CPTU precedentemente, durante e successivamente la fase di iniezione, per un totale di 27 prove (9 preliminari, 9 intermedi e 9 post-intervento).

Sono stati inoltre prelevati, mediante carotiere a

rotazione, campioni di terreno, trattato e non trattato.

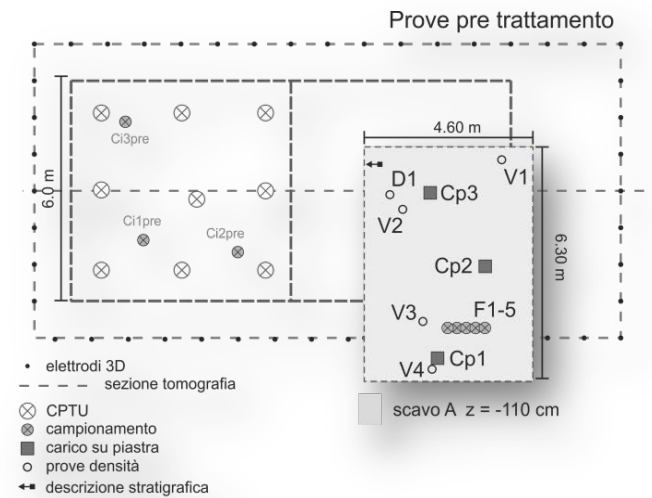


Figura 9 – planimetria e ubicazione del campo prove pre trattamento.

L'intera fase di consolidamento è stata monitorata attraverso indagini geofisiche di tomografia della resistività elettrica in time lapse, con l'acquisizione di 39 set di misure ERT corrispondenti agli intermedi effettuati in seguito a ciascuna iniezione di resina.

Per il monitoraggio si è impiegato un sistema di 48 elettrodi spazati di 1 metro, disposti secondo una geometria rettangolare $8 \text{ m} \times 16 \text{ m}$ che ha circondato le due porzioni - disturbata e indisturbata - del campo prove, come illustrato in figura 9.

L'analisi comparata di tutte le indagini ha permesso di individuare le caratteristiche litostratigrafiche del sito e di ricavare alcuni parametri del terreno in maniera indiretta, preservandolo da fasi di scavo. Com'è ovvio, sia i carotaggi che le prove penetrometriche hanno comportato una modifica, seppur minima, delle caratteristiche meccaniche del terreno nelle vicinanze dei punti dove sono state effettuate, di ciò si è tenuto debitamente in conto per la scelta delle aree nelle quali effettuare le successive prove.

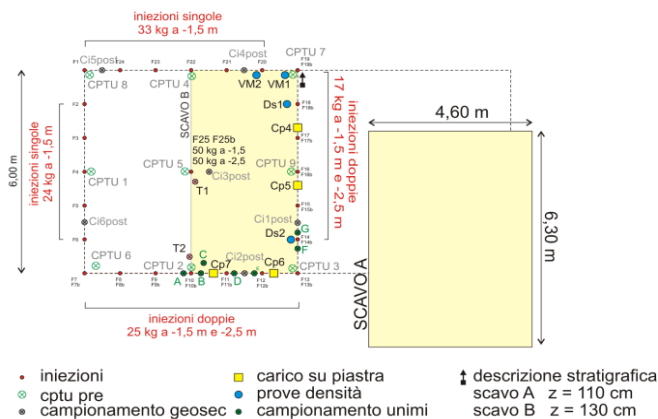


Figura 10 – Aree (in giallo) di scavo nel campo prove.

In una seconda fase si è proceduto allo scavo e alla rimozione del terreno, fino alla profondità di -110 cm dal piano campagna (scavo A di figura 10, rettangolo giallo a destra) nell'area attigua a quella del trattamento con resine, al fine di ottenere sezioni stratigrafiche esposte e, soprattutto, un piano di posa su cui eseguire prove geotecniche di densità e di carico su piastra e campionamenti pre-trattamento.



Figura 11 – Lo scavo a giorno del test site post iniezioni, si osservano i terminali dei piccoli tubi di iniezione della resina che fuoriescono dal terreno.

Una terza fase di investigazione è consistita nello scavo di una porzione di terreno fino alla profondità di -130 cm dal piano campagna (scavo B di figura 10, rettangolo giallo a sinistra e figura 11), intervenendo dunque sui volumi di terreno interessati dalle iniezioni. In questo modo è stato possibile osservare direttamente la distribuzione delle resine nel terreno ed esporre un piano di posa su cui eseguire le stesse

prove in situ post trattamento.

Le caratteristiche fisico-meccaniche del terreno, precedenti e successive all'intervento, sono state testate autonomamente dall'Università degli Studi di Milano.

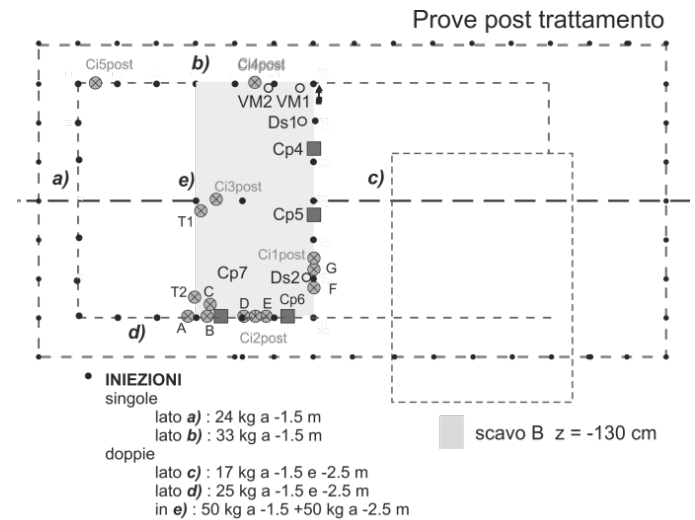


Figura 12 – planimetria e ubicazione del campo prove post trattamento.



Figura 13 – radice di resina nel terreno consolidato.

4.1 Caratteristiche del campo prove

Le informazioni sulla natura del sottosuolo, sulla stratigrafia e sull'assortimento granulometrico, derivano dall'analisi congiunta di:

- indagini condotte sullo scavo (A) e campionamenti;
- prove penetrometriche CPTU;
- indagine ERT pre-trattamento.

Lo scavo (A) ha messo in luce caratteri stratigrafici continui e omogenei lungo tutto il perimetro.

Si distinguono due orizzonti prevalenti: il primo, fino alla profondità di circa 55 cm, è costituito da argille e limi di colore bruno e granulometria omogenea con rari clasti millimetrici (figura 14).

Il secondo si estende almeno fino a fondo scavo ed è costituito da argille limose di colore bruno-giallastro, plastiche e molto consistenti. Apparati radicali di diametro anche centimetrico sono presenti fino a circa 70 cm dal p.c.. I risultati delle prove geotecniche si riferiscono a campioni prelevati a profondità prossime a 150 cm.

Si tratta di *limi con argilla, debolmente sabbiosi*, ovvero CL secondo classificazione USCS (Unified Soil Classification Sistem, adottata da ASTM, 1987), contenuto organico $O=5\div 10\%$, disuniformi o molto disuniformi (coefficiente di uniformità CU anche > 15), a media plasticità (limite liquido $W_L=40-53\%$ e indice plastico $IP=22-26\%$, in condizioni di umidità naturale $W=13\div 23\%$, consistenti o localmente molto consistenti figure 15 e 16).

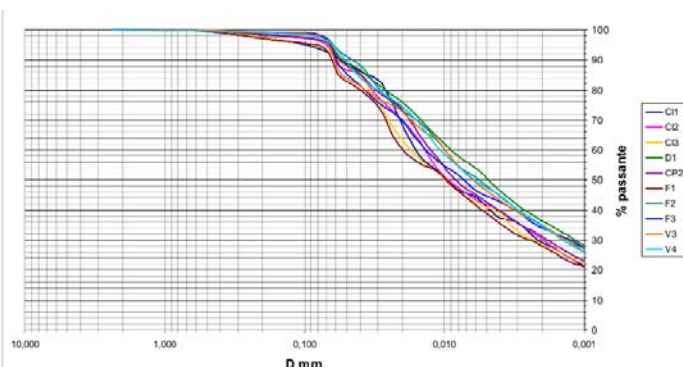


Figura 14 – sintesi dell'analisi granulometrica del terreno effettuata su 10 campioni in fase di PRE trattamento.

Carta di Plasticità di Casagrande

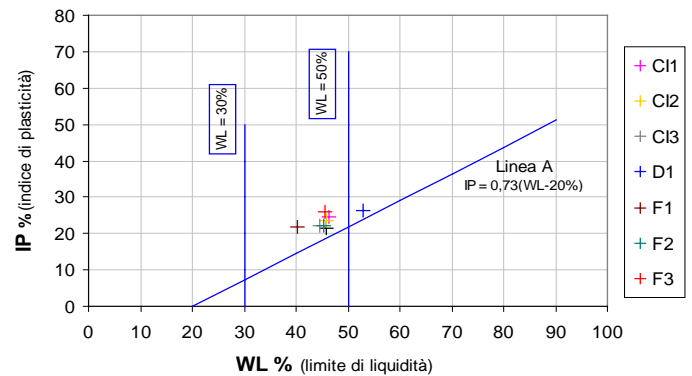


Figura 15 – Carta di plasticità di Casagrande relativa ai 7 campioni di terreno naturale analizzati. Il terreno risulta omogeneo e ricade nel campo delle argille inorganiche di media plasticità.

Carta di Attività

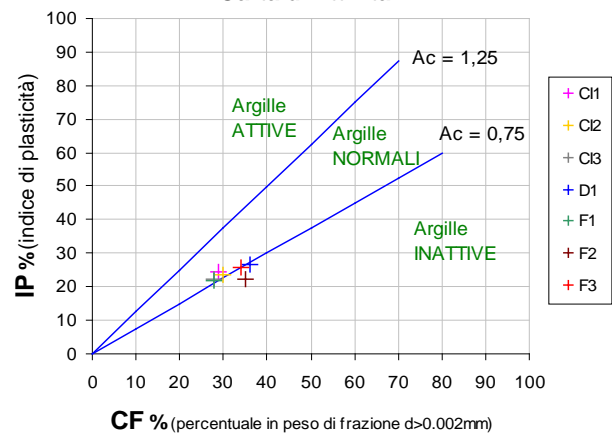


Figura 16 – Carta di attività relativa ai 7 campioni di terreno naturale analizzati. Tutti i campioni hanno indice di attività A_c inferiore o prossimi a 0,75. Argille inattive.

Il materiale estratto in situ, alla profondità di 110 cm dal p.c. è risultato avere i seguenti pesi di volume medi (figura 17):

Peso di volume medio del terreno in situ – Y_0 :

19,32 kN/m³

Peso di volume medio del terreno secco - Y_d :

16,10 kN/m³

Peso di volume medio del terreno saturo - Y_{sat} :

20,23 kN/m³

Peso specifico medio – G_s :

25,30 kN/m³

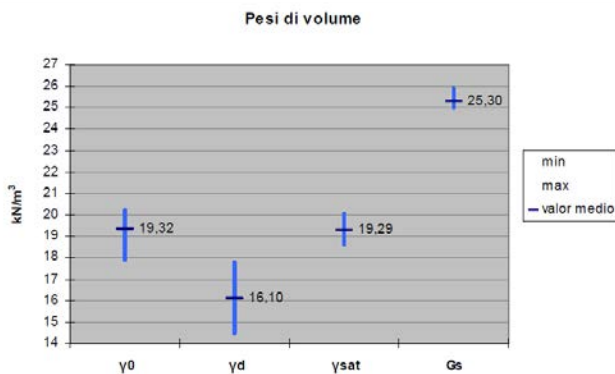


Figura 17 – Pesi di volume del terreno naturale. γ_0 - peso di volume naturale; γ_d - peso di volume secco; γ_{sat} - peso di volume saturo; G_s peso specifico del materiale.

è stato inoltre possibile ricavare indirettamente i parametri di porosità (n), indice dei vuoti (e), e la saturazione del terreno al momento del prelievo (Sr_0). I valori medi sono i seguenti:

- porosità media - n : **0,39**
- Indice dei vuoti medio - e : **0,64**
- Saturazione al momento del prelievo - Sr_0 : **0,81**

Il terreno poi è risultato avere una umidità media piuttosto elevata ed un contenuto organico modesto, valori espressi come percentuale in peso sono i seguenti:

- Umidità media in situ: **21%**
- contenuto organico medio: **7%**

Il contenuto d'acqua del terreno mostra una grande variabilità. Sono stati raggruppati i valori di umidità ottenuta in funzione del tipo di campionamento:

Gruppo	Tipo di campionamento	Tipo di campione	Tempo di conservazione	Condizioni climatiche in situ
A	Scavo a mano (Unimi)	Rimaneggiato	24 ore in sacchetti di plastica	Sereno (pioggia 24h precedenti)
B	Carotaggio a Pressione (Unimi)	Indisturbato	2 settimane in fustella	Sereno (pioggia 24h precedenti)
C	Carotaggio a rotazione (Geosec)	Indisturbato	1-2 mesi in fustella sigillata	---

Figura 18 - caratteristiche dei campioni sul quale è stata eseguita la prova di umidità. I campioni sono stati raggruppati in 3 gruppi in funzione delle modalità di prelievo.

Le prove CPTU, che hanno raggiunto profondità massime di circa 300 cm dal piano campagna, hanno consentito di ricavare i parametri di resistenza alla penetrazione Q_c , resistenza all'attrito laterale F_s , rapporto di attrito R_f , pressione U dei pori. Le informazioni fornite dalle CPTU ben si accordano con le evidenze dello scavo e i parametri geotecnici ricavati sui campioni prelevati. Buono è il riscontro anche con le informazioni fornite dalla tomografia della resistività elettrica, che compendia proprio i risultati ottenuti da prove penetrometriche e tomografiche della resistività. In figura 19 seguente è riportata una sezione verticale di resistività elettrica, estratta in corrispondenza dell'asse centrale del rettangolo di misura, longitudinalmente al lato lungo. La sezione è rappresentativa delle variazioni in profondità dei terreni investigati. Si osservano i seguenti orizzonti elettrostratigrafici, che rientrano nell'usuale gamma per litologie sciolte di pianura alluvionale, riportati in dettaglio in figura:

- primi 40-50 cm di terreno aerato con resistività dell'ordine dei 50-60 ohm m (limi colore bruno);
- fino a 1,5 metri di profondità valori di resistività intorno ai 20-35 ohm m (argillose limose plastiche);
- una fascia più resistiva tra i 2 e i 3 m di profondità (limi con argilla debolmente sabbiosi) delimita un orizzonte più profondo caratterizzato da un aumento delle resistività fino a valori di 100-150 ohm m, attribuibili alla presenza di granulometrie più grossolane (sabbie).

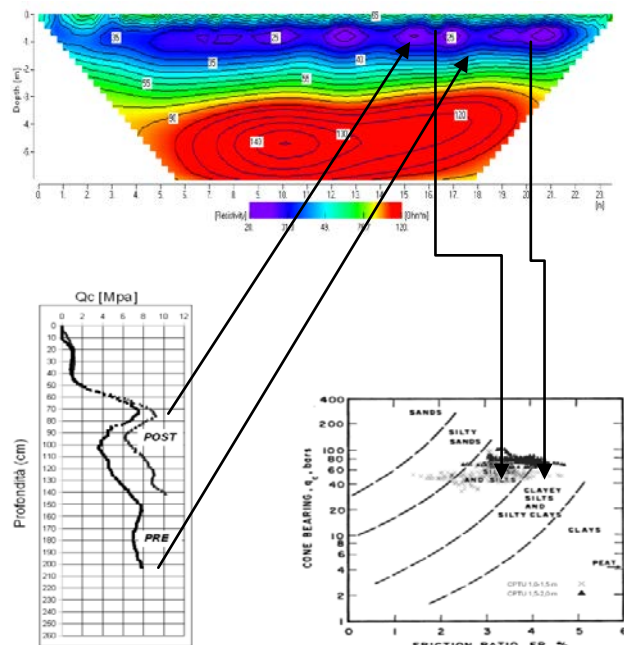


Figura 19 – Analisi litostratigrafica. (a) Confronto dei valori “pre-trattamento” e “post-trattamento”:

resistenza alla penetrazione Q_c da prova CPTU 6; (b) Sezione tomografica ERT (scala verticale adattata) con dettaglio dei livelli elettrostratigrafici identificati; (c) Confronto con classificazione dei terreni su diagramma Robertson-Campanella da prove CPTU.

Sempre in figura 19 è riportato la classificazione litologica, dedotta dall'insieme delle 9 CPTU pre-intervento, secondo lo schema di Robertson e Campanella (1982), relativamente ai due orizzonti di maggiore interesse al fine del trattamento, ovvero quelli che giacciono nell'intorno della quota di iniezione (-150 cm).

Sono dunque rappresentati i valori di Q_c e R_f per la serie di dati tra i 100 e 150 cm di profondità (simbolo grafico: croce) e per la serie 150-200 cm (triangolo). Si osserva come valori più bassi di resistenza alla penetrazione (5-6 MPa), che afferiscono allo strato più superficiale tra -100 e -150 cm, ben corrispondono alle litologie più conduttive (25-30 ohm m), attribuibili ad una maggiore presenza di materiale fine.

4.2 Proprietà geotecniche pre-trattamento

Sono state eseguite tre prove di taglio diretto (ASTM D3080) sui campioni CI1, CI2 e CI3 indisturbati di terreno allo stato naturale. Per entrambi i campioni sono stati preparati 3 provini (figura 20) dei quali si sono calcolati il peso di volume allo stato naturale e la porosità prima dell'esecuzione della prova.

I risultati ottenuti evidenziano valori coerenti con quelli comuni di una argilla di media plasticità come quella del terreno in esame e pari a: coesione $c' = 42-74$ kPa, angolo di resistenza $\phi' = 17-21^\circ$.



Figura 20 – provini CI3 x,y,z per la prova di taglio diretto.

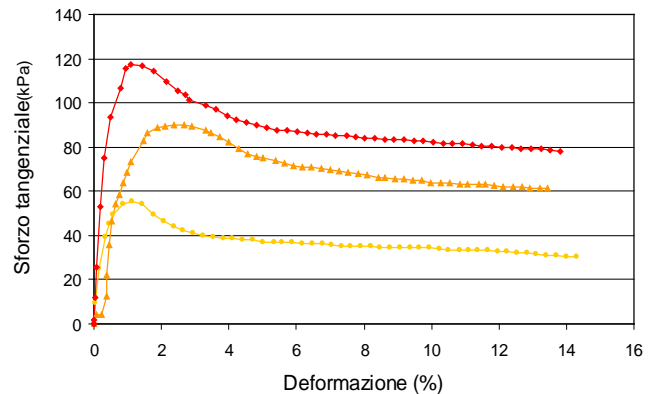


Figura 21 – grafico sforzo / deformazione relativo al campione CI1.

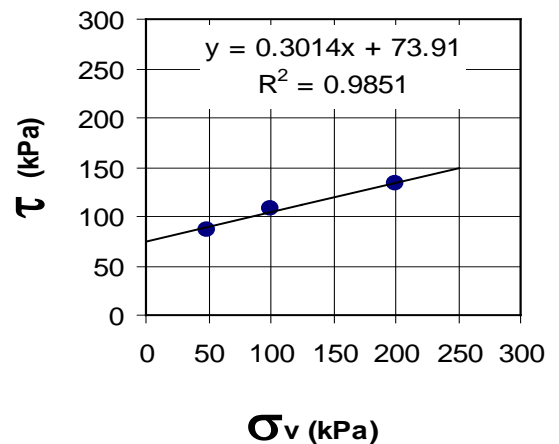


Figura 20 – Grafico sforzo normale / sforzo tangenziale relativo al campione CI1.

Si è ritenuto che prove di compressione ad espansione laterale libera (ELL), eseguite pre e post trattamento potessero essere uno strumento adatto a valutare l'efficienza del trattamento, in analogia a quanto suggerito nella valutazione di verifica dei trattamenti di inertizzazione (Apuani et al, 2006) e in considerazione del problema ingegneristico per cui i trattamenti vengono eseguiti. Il terreno investigato ha resistenza a compressione semplice $\sigma_c = 208$ kPa (valor medio di 6 campioni) con $\sigma_c = 159 \div 464$ kPa, e modulo elastico al 15% di σ_c $E_{15\%} = 20.0 \div 35$ MPa.

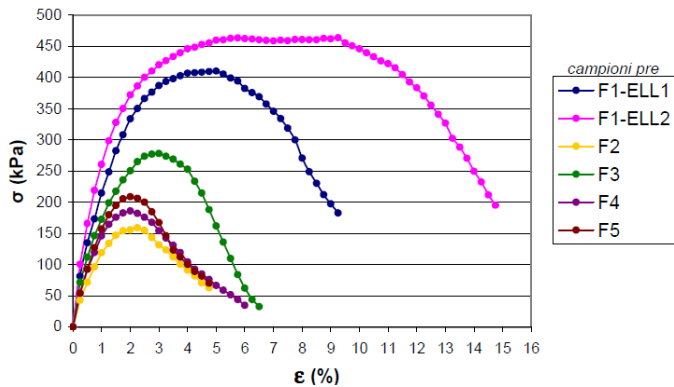


Figura 22 – Risultati delle prove di compressione semplice. Diagramma sforzo / deformazione.

I valori di resistenza e rigidità maggiori sono attribuibili a campioni con un certo disturbo indotto dal campionamento.

I valori di elasticità ottenuti alla scala del campione sono coerenti con il comportamento rivelato mediante prove di carico su piastra (fig. 25) eseguite a fondo scavo ($z = -130\text{cm}$) seguendo le norme CNR Mod T0116/A (CNR, 1992) con piastra di carico di diametro 30 cm, due cicli di carico, con carico massimo 0.35MPa, intervallati da una rapida fase di scarico. Le 3 prove (pre) in situ forniscono i seguenti moduli di compressibilità: $M_E = 13.95 \div 22.37$ MPa e $M_E' = 26.6 \div 31.12$ MPa calcolati rispettivamente sulla prima o seconda curva di carico (figura 23). In figura 24 invece anticipiamo per comodità di lettura i risultati delle 4 prove post trattamento: $M_E = 28,54 \div 38,56$ MPa e $M_E' = 47,57 \div 58,71$ MPa.

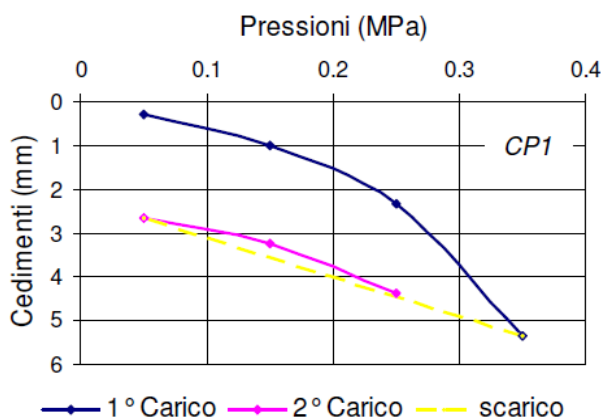


Figura 23 – Esempio di curva da prova di carico su piastra pre trattamento (3 prove).

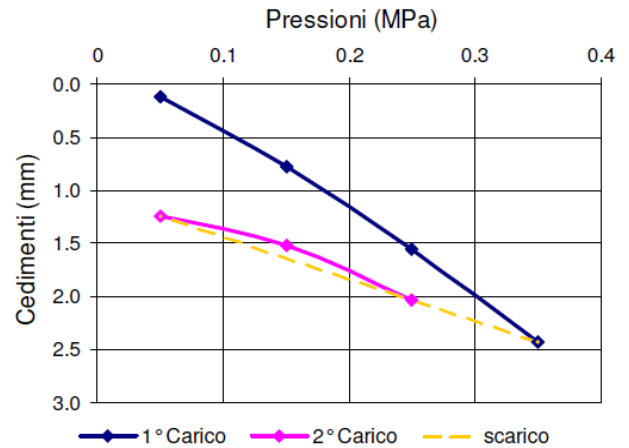


Figura 24 – Esempio di curva da prova di carico su piastra post trattamento (4 prove).



Figura 25 – L'equipe dell'Università degli Studi di Milano durante l'esecuzione della prova di carico su piastra.

4.3 Proprietà geotecniche post-trattamento e valutazione geotecnica dell'efficienza

La realizzazione dello scavo B ha consentito di riconoscere la distribuzione delle resine nel terreno. È ben evidente come la presenza di vuoti o canali preesistenti costituiscono la via di fuga preferenziale per la distribuzione delle resine (figura 26).



Figura 26 – Lo scavo a giorno a messo in evidenza i percorsi della resina nel terreno consolidato e fratturazioni indotte con propagazione sul piano orizzontale.

Tuttavia, dove tali vie non siano presenti, si riconoscono sistemi di fratturazione indotta con direzioni caratteristiche. La configurazione dei canali, anche centimetrici, occupati dalla resina indurita, rispetta le direzioni di sforzo indotte dall'iniezione. Si viene a costituire inoltre un reticolo capillare di resina che va a "rinforzare" il terreno nelle adiacenze (figura 27).



Figura 27 – Reticolo capillare di resina nel terreno che evidenzia una micro fratturazione indotta dall'espansione meccanica del formulato chimico.

Anche lo stato di umidità del terreno decresce sensibilmente in prossimità delle vene, così come la resistenza alla penetrazione (p_p) e la coesione non drenata (C_u) che, misurate lungo l'interasse (1 m) tra due iniezioni adiacenti, passano rispettivamente da $p_p \cong 350$ kPa con $C_u \cong 130$ kPa a $p_p > 441$ kPa con $C_u > 240$ kPa (valori di fondo scala strumentali). Visivamente si constata che, laddove non siano presenti canali di debolezza preesistenti, i canali di resina si distribuiscono occupando un intorno dell'ordine del metro dal centro di iniezione, con le pressioni di prova. Prove di densità, eseguite dal fondo scavo in prossimità delle iniezioni, consentono di ricavare il peso di volume naturale $\gamma_o = 19.2 \pm 0.8$ kN/m³ e quello allo stato secco $\gamma_d = 17.2 \pm 1.1$ kN/m³.

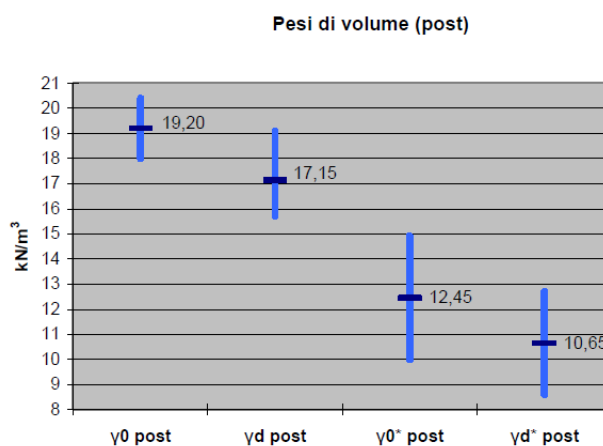


Figura 28 – Pesi di volume del terreno post trattamento; * indica i campioni T1 e T2 contenenti vene di resina.

Sebbene le misure siano dipendenti dall'entità di resina "impregnante" il volume investigato, si constata che la densità generale del terreno trattato risulta sostanzialmente invariata o comunque non rappresenta una grandezza significativa nella valutazione del trattamento. Questo può trovare una spiegazione considerando che la densità della resina, che ha occupato spazi vuoti preesistenti, è minore di quella dell'acqua.

Anche a scala minore i campioni sottoposti a prove geotecniche di laboratorio hanno gradi di "impregnazione" da resine differenti; le resine possono attraversare il campione in vene o impregnarlo in modo omogeneo; i campioni sottoposti a prove sono distinti in funzione della % di resina presente (<10%, 10-30%, >30%).



Figura 29 – Prelievo di campione del terreno "trattato".

La figura 30 confronta invece le curve sforzo-deformazione ottenute mediante prove ELL in campioni non trattati e trattati. I campioni trattati investigati hanno resistenza a compressione $\sigma_c = 1147$ (1026) kPa, valor medio di 9 campioni (8 campioni), con $\sigma_c = 2136 \div 788$ kPa, e modulo elastico medio $E_{15\%} = 84$ (76) MPa con modulo elastico al 15% di σ_c pari a $E_{15\%} = 62 \div 146$ MPa, **che equivale ad un incremento di oltre il 300% nei valori di resistenza a rottura e di circa 200% nei moduli di elasticità.**

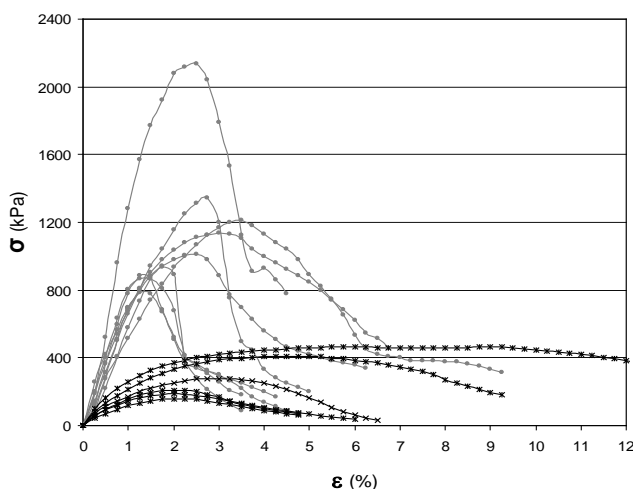


Figura. 30 – Curve sforzo-deformazione da prove di compressione monoassiale. Le curve in nero si

riferiscono a campioni "pre-trattamento", le curve in grigio a campioni "post trattamento".

Anche confrontando i valori di compressibilità ottenuti da prove di carico su piastra (figura 31), eseguite a fondo scavo tra due iniezioni uguali per trattamento, si apprezza il considerevole aumento della portanza del terreno, con $M_E = 28.5 \div 38.6$ MPa e $M_E' = 47.6 \div 58.7$ MPa calcolati rispettivamente sulla prima e seconda curva di carico.

La retta tratteggiata in figura 31 delimita i campi di valori tipici del materiale "pre-trattamento" da quelli "post-trattamento". I dati rivelano coerentemente un certo effetto scala e l'area ombreggiata in figura delimita prove di laboratorio con campioni di diametro 5 cm, mentre la piastra di carico ha diametro 30 cm.

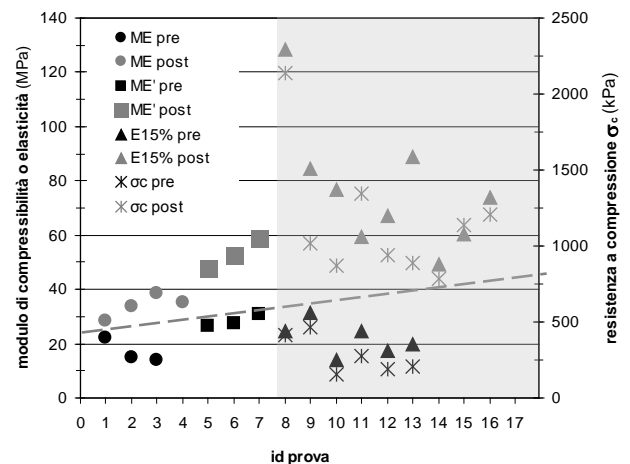


Figura 31 – Confronto dei valori "pre-trattamento" e "post-trattamento": Moduli di compressibilità ME e ME' (rispettivamente da primo e secondo ciclo di prova di carico su piastra), moduli elastici e valori di resistenza da prove di compressione ad espansione laterale libera (E15%).

Anche le prove CPTU eseguite dopo l'intervento testimoniano del miglioramento meccanico avvenuto nell'intorno dell'area trattata con valori di incremento medi, in termini di F_s , Q_c , R_f , (figura 32) di seguito riportati:

$$Q_{c, \text{pre}} \sim 7 \text{ MPa}, Q_{c, \text{post}} \sim 9 \text{ MPa}$$

$$F_{s, \text{pre}} \sim 0.2 \text{ MPa}, F_{s, \text{post}} \sim 0.5 \text{ MPa}$$

$$R_{f, \text{pre}} \sim 2.5\%, R_{f, \text{post}} \sim 4.5\%.$$

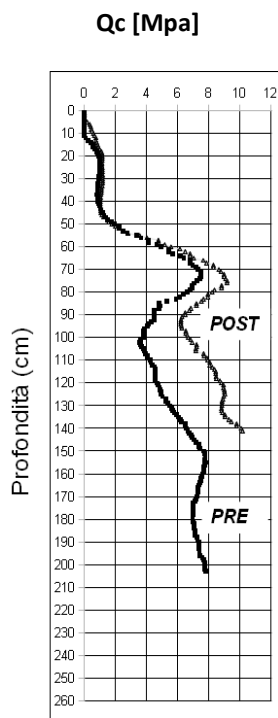


Figura 32 – un confronto CPTU pre e post consolidamento.



Figura 33 – Fase di esecuzione della prova CPTU.

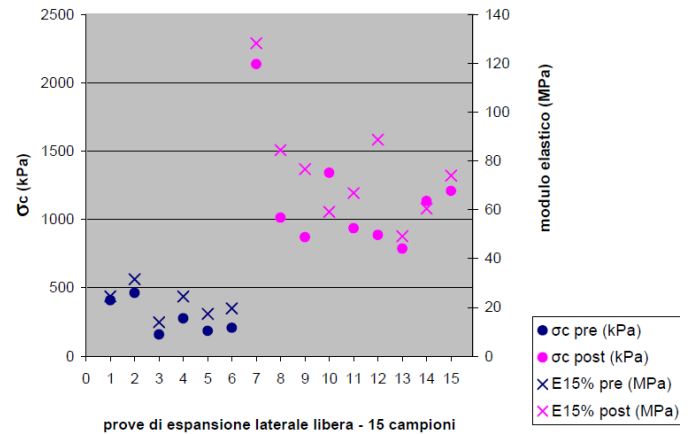


Figura 34 – confronto dei risultati delle prove di compressibilità semplice ottenuti testando campioni di terreno pre e post intervento. Per ogni prova è stata calcolata la resistenza a compressione non drenata e il modulo elastico del terreno pari al 15% dello sforzo a rottura.

4.4 Parametri geofisici post-trattamento

I risultati delle indagini geofisiche possono essere analizzati a due livelli di dettaglio: a livello di "macroscala" abbiamo la possibilità di osservare, in grande, le variazioni di resistività elettrica instauratesi nel volume di terreno oggetto del trattamento. Un livello di analisi nell'intorno del punto di iniezione può consentire un più diretto confronto delle informazioni geofisiche con quelle dedotte dalle prove geotecniche in situ e di laboratorio. La figura 35 descrive su grande scala quello che tipicamente si osserva in termini di modifiche del contesto geoelettrico al termine dell'intervento di trattamento. Sono evidenziati i volumi che hanno subito una variazione di resistività superiore al 20% rispetto ai valori iniziali pre-trattamento. L'immagine fa riferimento alle variazioni percentuali della resistività misurate sul terreno alla fine del trattamento di iniezione rispetto alla distribuzione di resistività di bianco. Un discreto aumento è riscontrabile in quei volumi di suolo in cui la resina ha spiazzato acqua, compattato e omogeneizzato il terreno riempiendone i vuoti, mentre si osservano decrementi in quelle porzioni di terreno in cui l'acqua è migrata sotto effetto dell'azione delle resine.

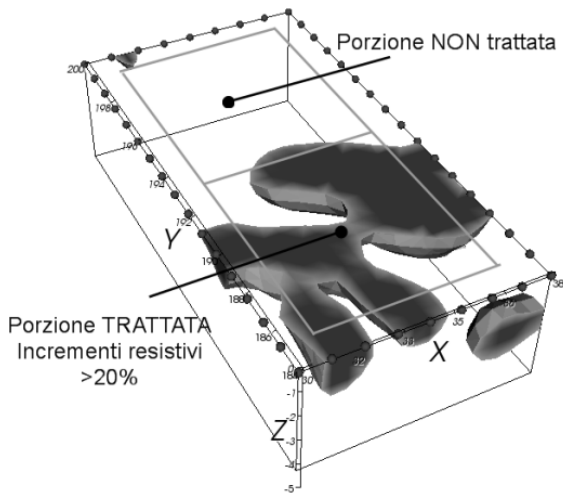
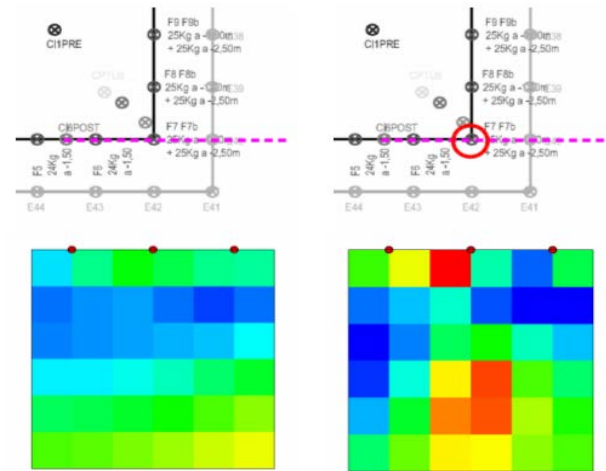


Figura 35 – ERT finale: volumi a variazione di resistività superiore al 20% rispetto ai valori pre-iniezione (bianco).

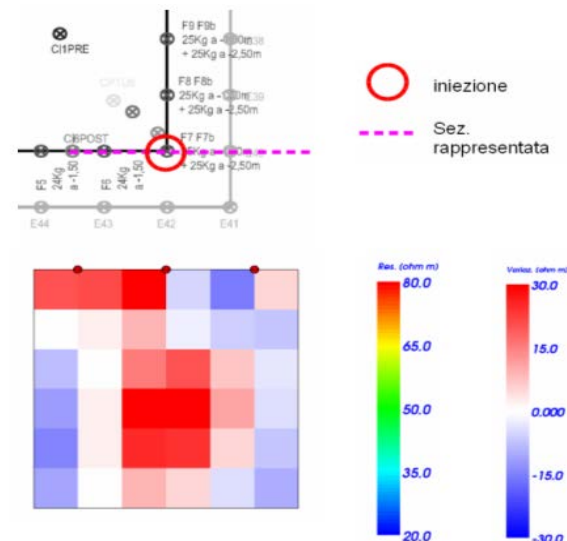
Per osservare questi risultati ad un livello di maggiore dettaglio, possiamo concentrarci a descrivere l'andamento delle variazioni dei valori di resistività elettrica nell'immediato intorno di un punto di iniezione, secondo lo schema di figura 36.

La figura riporta i valori di resistività elettrica riscontrati nelle celle all'intorno di un punto di iniezione, in corrispondenza della misura ERT pre-trattamento (tempo T_0 , prima colonna) e poi osservati al tempo T_1 (seconda colonna) successivamente all'iniezione. Nella terza colonna, infine, sono espresse le variazioni assolute della resistività per ciascuna cella. Decisi incrementi di resistività sono riscontrati nel nucleo interno più prossimo al punto di iniezione, con variazioni anche dell'ordine del 50-100%, molto coerenti con gli incrementi delle proprietà meccaniche evidenziati dai test geotecnici e descritti nel paragrafo precedente: l'aumento resistivo è conseguenza della riduzione dell'indice dei vuoti e della compattazione del terreno. Il progressivo allontanamento dal punto di iniezione mette in evidenza zone a decremento resistivo da attribuire, come detto, all'effetto di spiazzamento di acqua dai pori conseguente all'espansione della resina.



Resistività tempo T_0 (bianco)

Resistività tempo T_1 (dopo iniezione in F7)



Var. resistività tempo T_1 (dopo iniezione in F7)

Figura 36 – Dettaglio delle variazioni di resistività elettrica nell'intorno di un punto di iniezione (F7).

L'esecuzione di due livelli sovrapposti di iniezioni di resina nel terreno ha permesso di identificare, grazie alla tomografia della resistività elettrica, i volumi di influenza delle iniezioni. In particolare l'incremento di resistività elettrica si è confermato per quelle porzioni di terreno che hanno incrementato le loro proprietà meccaniche. L'incremento resistivo infatti è stato risultante e ha evidenziato (fig. 37) lo spiazzamento di acqua interstiziale dapprima verso il basso (livello 1) e poi verso sinistra (livello 2) con conseguente riduzione dei vuoti. Con il secondo livello di iniezioni posto a -

250 cm dal p.c. è stato possibile riscontrare effetti di miglioramento anche oltre i 4 metri di profondità e secondo una omogeneità resistiva risultante per tutto il volume trattato.

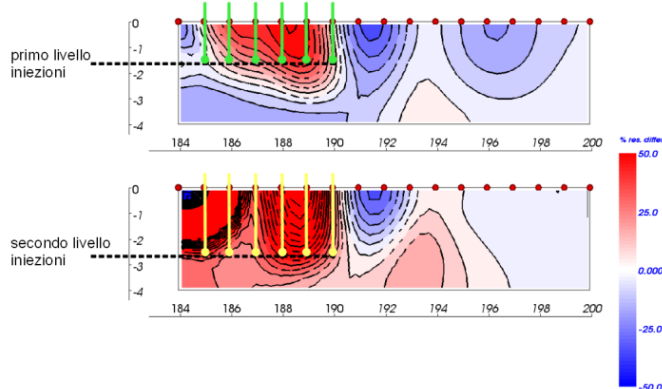


Figura 37 – Immagini a sezione verticale di tomografia della resistività elettrica ottenute da ologramma 4D in corso di iniezione. Nell'immagine sopra è rappresentato l'incremento di resistività nel terreno consolidato con il primo livello di iniezioni poste alla profondità di - 150 cm. Nell'immagine sotto l'incremento ottenuto grazie al secondo livello di iniezioni poste a - 250 cm.

5. Conclusioni

La sperimentazione condotta ha consentito, attraverso un approccio multidisciplinare, di documentare le modalità con cui si esplica il processo di consolidamento dei terreni mediante iniezioni di resine espandenti, nonché di valutare i volumi coinvolti e l'efficienza del trattamento in termini di incrementi di resistenza, di rigidità e di resistività.

Le osservazioni dirette lungo le pareti di scavo hanno fornito indicazioni riguardo alla distribuzione e propagazione delle resine iniettate, ed insieme alle tomografie elettriche 3D, consentono di stimare i volumi coinvolti nel processo. Le prove geotecniche in situ e in laboratorio hanno evidenziato come i terreni esaminati nelle vicinanze delle zone iniettate incrementino sensibilmente sia le loro caratteristiche di resistenza sia quelle di rigidità. A giudizio dell'equipe che ha condotto questi studi sul test site, il contributo di queste iniezioni è duplice:

da una parte legato alla riduzione dell'indice dei vuoti indotto dall'espansione delle resine, dall'altra parte alla presenza della resina stessa che compatta in modo piuttosto omogeneo il terreno trattato.

I modelli di resistività elettrica 3D consentono di individuare il raggio di azione di ogni intervento di

iniezione ed il conseguente incremento di resistività, testimoniando il processo di compattazione e di migrazione delle acque eventualmente presenti.

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.

6. Bibliografia

Brevetto Europeo n. EP1914350 - Marco Occhi, Andrea Occhi, Daniele Gualerzi - GEOSEC s.r.l.

Apuani, T., Giani G.P., d'Attoli M., Fischanger F., Santarato G., 2011. *Valutazione dell'efficienza delle iniezioni di resine espandenti per il consolidamento dei terreni di fondazione mediante prove geotecniche e indagini di tomografia elettrica tridimensionale.* XXIV Convegno Nazionale di Geotecnica - Associazione Geotecnica Italiana, Napoli 22-24 Giugno 2011.

ASTM, American Society for testing and Materials, 1987. *Annual book of ASTM Standards. Soil and rock; building tones geotextiles - 04-08: D2487, D1556; D2167.*

Apuani T., Beretta G.P, Pellegrini R. 2006. *"Linee Guida per l'inertizzazione in situ dei suoli contaminati".* n°12 - Provincia di Milano

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.

Morelli G., LaBrecque D.J., 1996. *Advances in ERT inverse modelling,* European Journal of Environmental and Engineering Geophysical Society, 1(2), 171-186.

Robertson P.K., Campanella R.G., 1982. *Interpretation of Cone Penetration Tests. Part 1 and Part 2,* Soil Mechanics Series N. 60. British Columbia University – Vancouver, Canada.

CNR, 1992 *Determinazione dei moduli di deformazione Md e Md' mediante prova di carico a doppio ciclo con piastra circolare* Bollettino Ufficiale (Norme tecniche) anno XXVI n. 146.

Santarato, G., Ranieri, G., Occhi, M., Morelli, G., Fischanger F. and 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.



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

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



www.geosec.it