

Valutazione dell'efficienza delle iniezioni di resine espandenti per il consolidamento dei terreni di fondazione mediante prove geotecniche e indagini di tomografia elettrica tridimensionale.

Prof.ssa Apuani T., Prof. Ing. Giani G. P.

Dipartimento di Scienze della Terra "A. Desio", Università degli Studi di Milano, Milan, Italy

Ing. d'Attoli M.

Geosec Srl, Parma, Italy

Ing. Fischanger F.

Geostudi Astier s.r.l., Livorno, Italy

Prof. Ing. Ranieri G.

Dipartimento di Ingegneria del Territorio, Università degli Studi di Cagliari, Cagliari, Italy

Prof. Santarato G.

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Ferrara, Ferrara, Italy

SOMMARIO

Tecniche di consolidamento di terreni mediante iniezioni di resina espandente sono state 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 un procedimento che prevede, in abbinamento alle tradizionali prove geotecniche, l'applicazione di metodi geofisici, in particolare della tomografia di resistività elettrica 3D, per poter acquisire, anche nei volumi di terreno difficilmente accessibili, quelle informazioni necessarie al progetto del consolidamento e al suo monitoraggio in corso d'opera. E' secondo questo approccio di intervento, e con modalità del tutto simili alle condizioni di cantiere, che vengono presentati i risultati ottenuti in un campo prove in vera grandezza, interessato da iniezioni di resina espandente poliuretanicamente bicomponente.

Parole chiave: consolidamento terreno, indagini geotecniche e geofisiche

1 Consolidamento dei terreni con resine

1.1 Introduzione

L'applicazione di tecniche di consolidamento del terreno con resine ha avuto forte incremento negli ultimi anni, soprattutto a seguito dello sviluppo di nuovi materiali e metodologie appositamente studiati per questo campo di applicazione.

I primi interventi risalgono alla seconda metà degli anni cinquanta negli Stati Uniti e negli anni novanta in Europa. Oggi sono disponibili sul mercato per diverse applicazioni. Tra quelle più diffuse ricordiamo le tecniche di consolidamento mediante iniezione a diffusione libera di resina nel terreno e quelle miste, che abbinano la resina iniettata ad un elemento strutturale portante collegato alla fondazione esistente per il trasferimento del carico 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 e di cui è garantita la massima compatibilità ambientale. Non sono infine da sottovalutare alcuni aspetti pratici come la rapidità, la flessibilità dell'intervento e la possibilità di operare in qualunque spazio con mezzi poco ingombranti.

La finalità delle tecniche di consolidamento con resine

è quella di eliminare le cause dei cedimenti delle fondazioni attraverso l'iniezione nel terreno di un materiale polimerico espandente. I trattamenti di iniezione sono rivolti a risolvere tutte quelle problematiche che implicano cedimento e abbassamento del terreno e conseguente danneggiamento di edifici e strutture.

I cedimenti del terreno sono spesso dovuti a periodi di siccità alternati a intense precipitazioni, perdite fognarie, traffico veicolare intenso, scavi nelle vicinanze dell'edificio, crescita di radici di piante ad alto fusto e variazione del carico applicato. L'interazione tra acqua e terreno di fondazione 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 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.

1.2 La tecnica di intervento

La tecnica Geosec di consolidamento con resina prevede di iniettare il materiale polimerico nei volumi di terreno interessati dal cedimento. Le proprietà intrinseche della resina rivestono, ovviamente, grande importanza. Dopo l'iniezione, infatti, la resina si espande rapidamente già dopo 30 secondi dal contatto con il terreno per reazione chimica esotermica, contrastando in maniera attiva il cedimento. L'effetto osservato è triplice:

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

La resina viene iniettata direttamente nei punti di interesse mediante tubi di piccolo diametro. Quantità e formulazione variano in funzione della tipologia di problema e, nel caso della tecnica qui descritta, anche in funzione delle risultanze diagnostiche geofisiche e geotecniche ottenute prima e durante le iniezioni. 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. Poiché la forza espandente della resina è funzione della 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.

Questa sequenza metodologica è, nella tecnica di intervento qui descritta, supportata dall'indagine geofisica di tomografia 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. 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 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.

Dal momento che la letteratura scientifica in questo settore è ancora molto "giovane", lo scopo del presente lavoro 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 è stato allestito un campo prove in scala reale 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. Concordemente alla pratica di cantiere, indagini geofisiche di tomografia di resistività elettrica tridimensionale sono state condotte al fine di acquisire, anche nei volumi di terreno difficilmente accessibili o 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 confrontate con le risultanze delle indagini geofisiche.

1.3 La resina espandente

Le proprietà meccaniche della resina utilizzata denominata "Eco-Maxima" (Geosec, 2006) sono state studiate presso i laboratori dell'Università degli Studi di Parma e presso le strutture del laboratorio R&S di Parma.

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

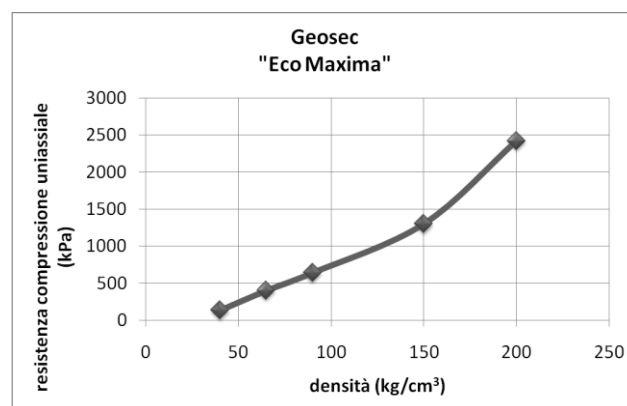


Figura 1. Resistenza a compressione monoassiale di provini di resina Geosec "Eco-Maxima", (valori medi su 6 provini,) determinata secondo norma UNI 6350-68 dal Laboratorio R&S (dati Geosec, 2006).

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 1).

1.4 Il monitoraggio delle iniezioni mediante tomografia di resistività elettrica tridimensionale

La tomografia di 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 ERT 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 LaBrecque, 1996).

In virtù dell'estrema sensibilità della metodologia ERT 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 poliuretaniche (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 questa nota, che nella pratica di cantiere procede secondo l'approccio di seguito descritto (Fischanger et al., 2007).

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 suoli. 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.

3. Nel corso dell'intervento di iniezione, indagini ERT intermedie, eseguite utilizzando lo stesso stendimento elettrodo, progettato nella fase 1, vengono condotte con lo scopo di investigare lo stato di trattamento del volume di terreno interessato dal cedimento 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.
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.

2. IL CAMPO PROVE: PROVE GEOTECNICHE E MONITORAGGIO CON ERT 3D

2.1 Il campo prove

Per valutare il trattamento di consolidamento dei terreni di fondazione mediante iniezione di resine espandenti è stato approntato, in collaborazione con Geosec srl, 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.

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.

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.

Il sito test è un campo destinato ad uso agricolo, oggi incolto. Nell'area investigata, di estensione 6x12m², si è scelto di isolare due porzioni quadrate attigue di 6 metri di lato ciascuna (Figura 2). 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, lungo il perimetro dell'area 6x6 m² interessata dal trattamento, con un interasse di 1 metro. Alcune ripetizioni dell'iniezione

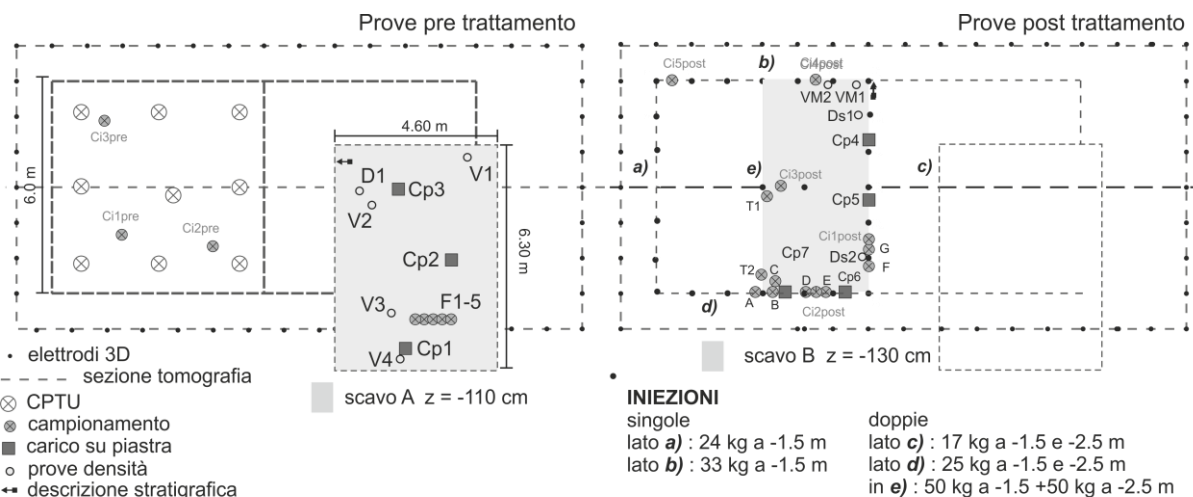


Figura 2. Mappa del campo prove con ubicazione e specifica dei siti di campionamento e delle prove geotecniche e geoelettriche. Gli identificativi di prova o campionamento riguardano: V = prova di densità con volumometro a membrana; D = prova di densità con volumometro a sabbia; VM = prova di densità con volumometro a membrana post trattamento; Ds = prova di densità con volumometro a sabbia post trattamento; Cp = prova di carico su piastra; F = campionamenti con fustella.

sul medesimo punto 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 (figura 2). L'intera fase di consolidamento è stata monitorata attraverso indagini geofisiche di tomografia elettrica 3D, 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 m x 16 m che ha circondato le due porzioni - disturbata e indisturbata - del campo prove, come illustrato in figura 2. 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, preservando il suolo 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.

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 2) 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.

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 2), 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 dall'Università degli Studi di Milano.

2.2 Caratteristiche litostratigrafiche 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: 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. 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 System, adottata da ASTM, 1987), contenuto organico $O=5\div 10\%$, disuniformi (coefficiente di uniformità $CU=9\div 18$), 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. Prove di densità eseguite in situ mediante volumometro a sabbia (ASTM D1556) e a membrana (ASTM D2167) o in laboratorio con metodo del cilindro sagomato tagliente (ASTM D2937), forniscono valori di peso di volume naturale $\gamma_o=19.3\pm 0.7\text{ kN/m}^3$, peso di volume secco $\gamma_d=16.1\pm 0.9$

kN/m^3 , una porosità calcolata $n=33\%$, essendo il peso specifico assoluto misurato $\gamma_s=25.3\pm 0.5 \text{ kN/m}^3$. (valori medi \pm deviazione standard).

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 elettrica, come illustrato in figura 3, che compendia proprio i risultati ottenuti da prove penetrometriche e tomografiche. In figura 3b 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 3b:

- 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).

In figura 3c 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.

2.3 Proprietà geotecniche pre-trattamento

I parametri di resistenza al taglio, ottenuti da prove di taglio diretto (ASTM D3080) su campioni indisturbati, risultano pari a: coesione $c'=42-74 \text{ kPa}$, angolo di resistenza $\phi'=17-21^\circ$.

Si è ritenuto che prove di compressione ad espansione laterale libera (ELL), eseguite pre e post trattamento potessero essere uno strumento più adatto per 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 $\sigma_c = 208 \text{ kPa}$ (valor medio di 6 campioni) con $\sigma_c=159\div 464 \text{ kPa}$, e modulo elastico al 15% di σ_c $E_{15\%}=14.0\div 31.6 \text{ MPa}$. 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 eseguite a fondo scavo ($z=-130 \text{ cm}$) seguendo le norme CNR Mod T0116/A (CNR, 1992), con piastra di carico di diametro 30cm, eseguendo due cicli di carico, con carico massimo 0.35 MPa , intervallati da una rapida fase di scarico. Le prove in situ forniscono i seguenti moduli di compressibilità: $M_E=13.9\div 22.4 \text{ MPa}$ e $M_E'=26.6\div 31.1 \text{ MPa}$ calcolati rispettivamente sulla prima o seconda curva di carico.

2.4 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 costituiscano la via di fuga preferenziale per la distribuzione delle resine (figura 4a).

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 (figura 4b).

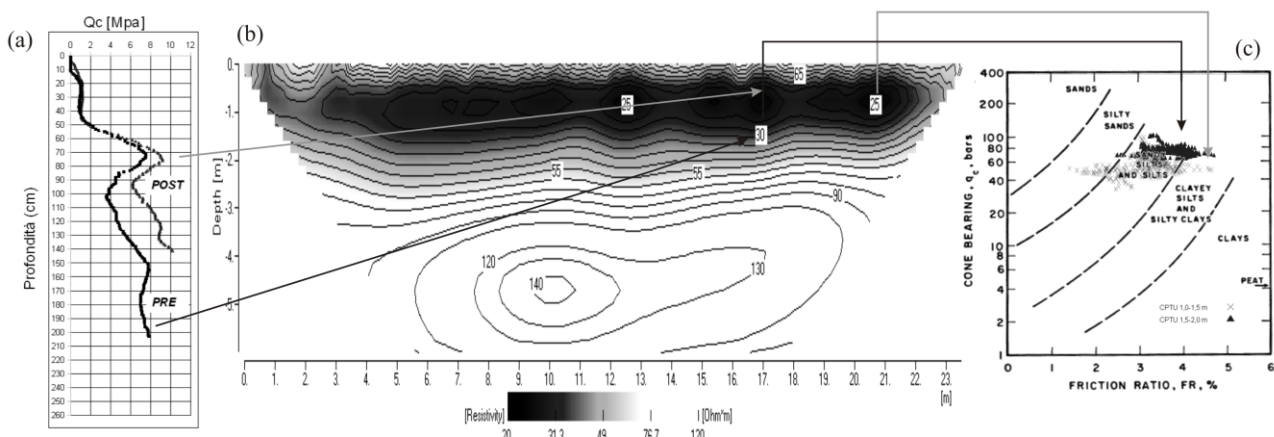


Figura 3. Analisi litostratigrafica. (a) Confronto dei valori "pre-trattamento" e "post-trattamento": resistenza alla penetrazione Q_c da prova CPTU 6; (b) Sezione tomografica ERT (scala verticale adattata) con dettaglio dei livelli elettrostratigrafici identificati; (c) Confronto con classificazione dei terreni su diagramma Robertson-Campanella da prove CPTU.

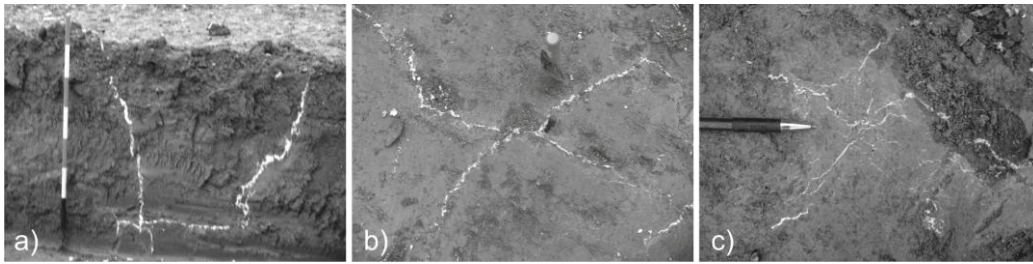


Figura 4: Effetti del trattamento con resine: propagazione delle resine in terreni argillosi. a) ramificazioni principali e risalita lungo canali di debolezza preferenziali; b) fratturazione indotta e propagazione sul piano orizzontale; c) ramificazioni capillari.

Si viene a costituire inoltre un reticolo capillare di resina che va a “rinforzare” il terreno nelle adiacenze (figura 4c). Anche lo stato di umidità del terreno decresce sensibilmente in prossimità delle vene, così come la resistenza alla penetrazione (pp) e la coesione non drenata (Cu) che, misurate lungo l’interasse (1 m) tra due iniezioni adiacenti, passano rispettivamente da $pp \approx 350$ kPa con $Cu \approx 130$ kPa a $pp > 441$ kPa con $Cu > 240$ 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. 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%).

La figura 5 confronta le curve sforzo-deformazione ottenute mediante prove ELL in campioni non trattati e trattati. I campioni trattati investigati hanno resistenza a compressione $\sigma_c = 1147$ kPa (valor medio di 9 campioni) con $\sigma_c = 788 \div 2136$ kPa, e modulo elastico medio $E_{15\%} = 76$ (MPa) con $E_{15\%} = 49.2 \div 128.2$ MPa, che equivale ad un incremento di oltre il 300% nei valori di resistenza a rottura e di circa 250 % nei moduli di elasticità.

Anche confrontando i valori di compressibilità ottenuti da prove di carico su piastra (figura 6), 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 6 delimita i campi di valori tipici del materiale “pre-trattamento” da quelli “post-trattamento”. I dati rivelano coerentemente un certo effetto scala: l’area ombreggiata in figura delimita prove di laboratorio con campioni di diametro 5 cm, mentre la piastra di carico ha diametro 30 cm.

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 3a) di seguito riportati:

$$\begin{aligned} Q_{c, \text{pre}} &\sim 7 \text{ MPa}, Q_{c, \text{post}} \sim 9 \text{ MPa} \\ F_{s, \text{pre}} &\sim 0.2 \text{ MPa}, F_{s, \text{post}} \sim 0.5 \text{ MPa} \\ R_{f, \text{pre}} &\sim 2.5\%, R_{f, \text{post}} \sim 4.5\%. \end{aligned}$$

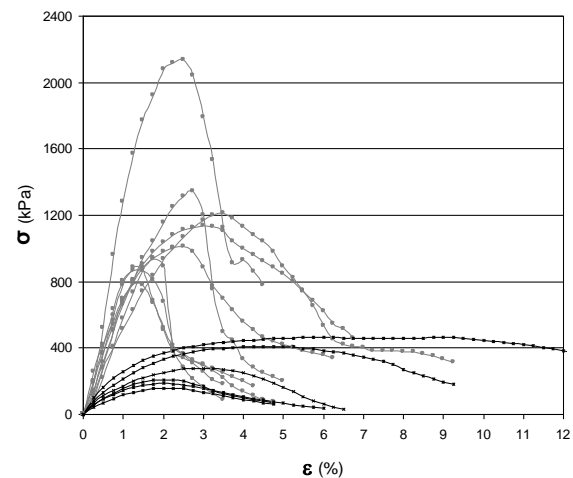


Figura 5: Curve sforzo-deformazione da prove di compressione monoassiale. Le curve in nero si riferiscono a campioni “pre-trattamento”, le curve in grigio a campioni “post trattamento”.

2.5 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.

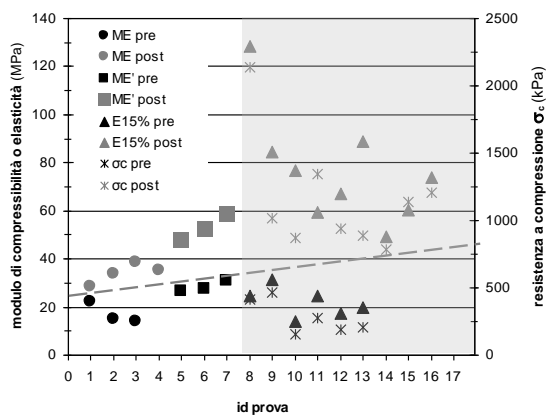


Figura 6: Confronto dei valori “pre-trattamento” e “post-trattamento”: Moduli di compressibilità ME e ME’ (rispettivamente da primo e secondo ciclo di prova di carico su piastra), moduli elastici e valori di resistenza da prove di compressione ad espansione laterale libera (E15%).

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 7 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.

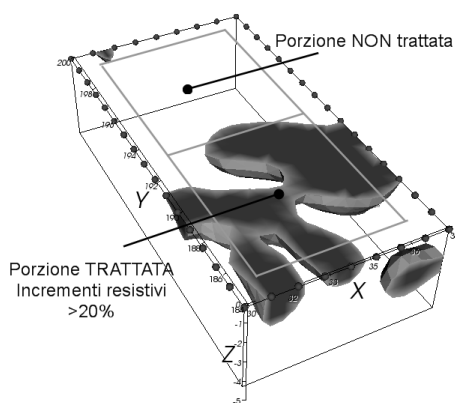


Figura 7. ERT finale: volumi a variazione di resistività superiore al 20% rispetto ai valori pre-iniezione (bianco).

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 8.

La figura 8 riporta i valori di resistività elettrica riscontrati nelle celle all’intorno di un punto di iniezione, in corrispondenza della misura ERT pre-trattamento (tempo T0, prima colonna) e poi osservati al tempo T1 (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 geotecniche 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.

3. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

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 degli scriventi 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.

4 BIBLIOGRAFIA

ASTM, American Society for testing and Materials, 1987. *Annual book of ASTM Standards. Soil and rock;*

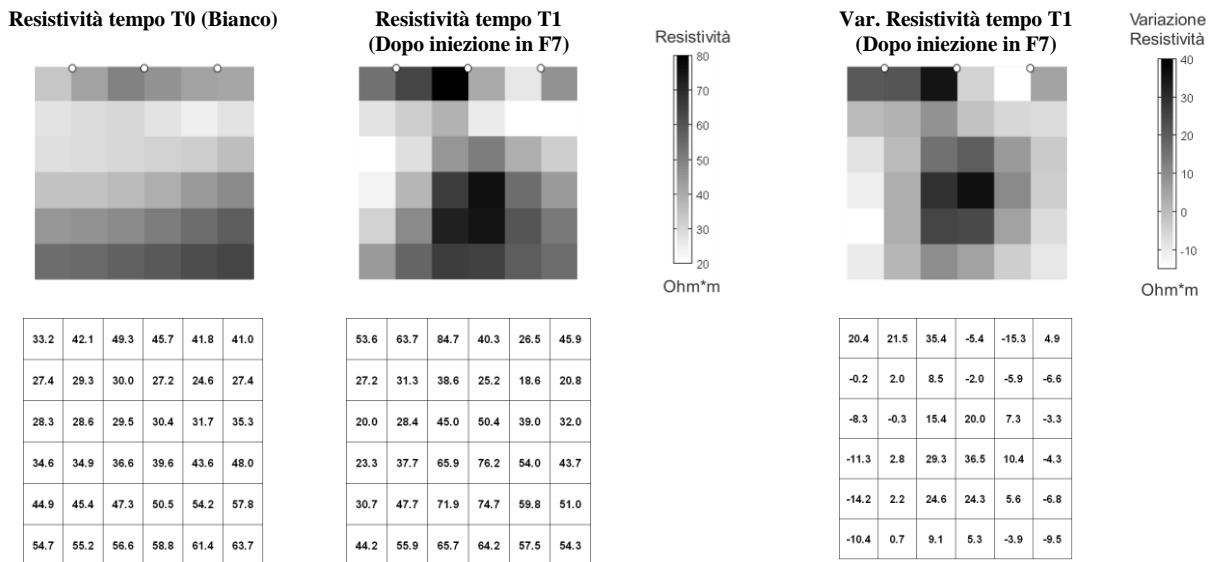


Figura 8. Dettaglio delle variazioni di resistività elettrica nell'intorno di un punto di iniezione.

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.

ABSTRACT

ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF INJECTIONS OF EXPANDING RESINS FOR SOIL CONSOLIDATION BY MEANS OF GEOTECHNICAL TESTS AND 3D ELECTRICAL RESISTIVITY TOMOGRAPHY

Keywords: soil consolidation treatments, geotechnical tests, Electrical Resistivity Tomography

The increment of settlement and displacements of shallow building foundations are induced by several phenomena.

Additional loads during the building life and the lack of periodical maintenance, especially in the drainage systems can facilitate swelling and ageing of soil, worsened by seasonal climate cycles, which favor alternating phenomena of prolonged drought followed by sudden heavy rainfalls. Runoff of finer soil fractions and changes in the moisture content significantly affect the balance between foundations and bearing soils.

Vertical differential displacements, caused by both natural events or human activities, always require a proper investigation of the state of the soil below the foundation, in order to better identify anomalies responsible for the instability and consequently plan the most appropriate consolidation treatment.

Geosec has developed a procedure for soil consolidation by the use of expanding bicomponent polyurethane resins injections controlled by traditional geotechnical laboratory and in situ tests and geophysical imaging of the ground. In particular time-lapse three dimensional Electrical Resistivity Tomography (3D ERT) is used in order to enable the effective 3D imaging of the foundation soils, before, during and after the injection treatment.

A full-scale test site was prepared for this purpose integrating these two methodologies. The strength and deformation soil parameters have been determined by in situ and laboratory tests, preliminary and after the injection treatment and the results compared with the 3D resistivity distribution derived from ERT surveys.

The presented results show the capabilities both of the injection treatment and the adopted monitoring techniques. An appreciable increment of the strength e deformation features and bearing capability are documented. This work helps to define operational procedures and guidelines for the design and test of the consolidation process with resins and provides important information that can be recognized as criteria for design or verification of treatment performance.