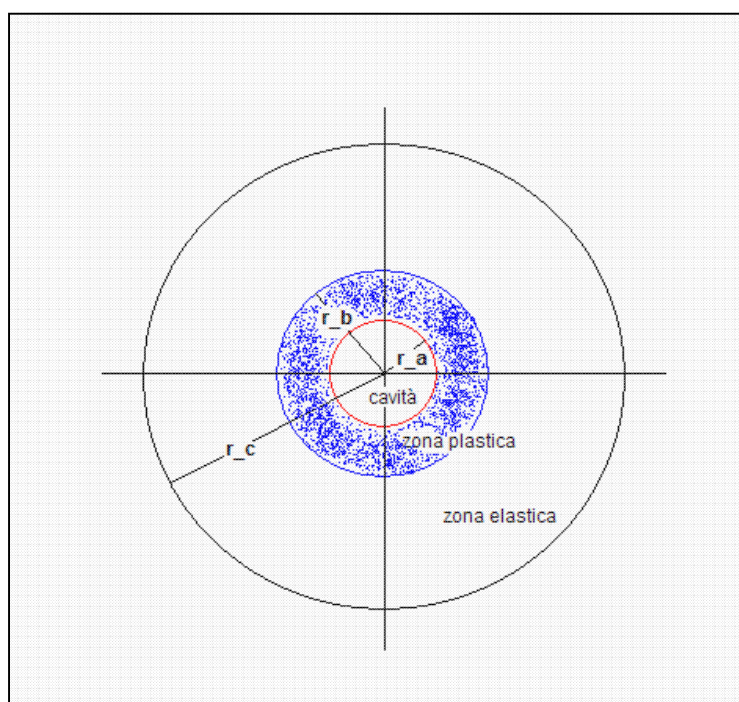




MODELLAZIONE ANALITICA DEL MIGLIORAMENTO DEL TERRENO ATTRAVERSO INIEZIONI DI RESINA AD ALTA PRESSIONE D'ESPANSIONE



Memoria presentata al 6° congresso internazionale su
GROUND IMPROVEMENT TECHNIQUES
Coimbra, 18-19 luglio 2005



Memoria presentata al 6° congresso internazionale su

GROUND IMPROVEMENT TECHNIQUES

Coimbra, 18-19 luglio 2005

MODELLAZIONE ANALITICA DEL MIGLIORAMENTO DEL TERRENO ATTRAVERSO INIEZIONI DI RESINA AD ALTA PRESSIONE D'ESPANSIONE

A. Dei Svaldi, Università IUAV Venezia, Italia

M. Favaretti, Università of Padova, Italia

A. Pasquetto, Uretek s.r.l., Italia

G. Vinco, Uretek s.r.l., Italia

SOMMARIO

Le resine poliuretatiche, ad alta pressione d'espansione, sono oggi utilizzate sempre più frequentemente nel consolidamento dei terreni tramite iniezioni. In questa memoria viene presentato un metodo basato sulla teoria dell'espansione della cavità, volto a quantificare il grado di miglioramento del terreno prodotto dalle iniezioni di resina. Viene inoltre riportato un confronto tra i dati teorici attesi ed i risultati di prove effettuate in situ. Basandosi sui risultati ottenuti con prove specifiche di laboratorio, condotte su provini di resina, i precedenti studi concernenti l'espansione della cavità sono stati modificati introducendo una relazione sperimentale tra la pressione d'espansione della resina e la pressione di confinamento offerta dal terreno trattato. La differenza di comportamento mostrata dai terreni coesivi rispetto a quelli granulari dipende dalla loro permeabilità alla resina. La stessa, nella sua fase liquida, espande nei terreni coesivi in un corpo monolitico e permea assai poco il terreno, rompendolo lungo micro fessure. Al contrario, dopo l'iniezione in terreni granulari, la resina liquida riempie i vuoti del terreno dando origine ad un materiale con resistenza a compressione paragonabile a quella del calcestruzzo.

Parole chiave: iniezioni, miglioramento del terreno, resine espandenti, fondazioni superficiali.

1. Premessa

La necessità di realizzare cantieri geotecnici in condizioni difficili, luoghi chiusi e spazi operativi ridotti, ha portato allo sviluppo di particolari tecniche di miglioramento del terreno quali quella Uretek presentata in questa memoria.

Nel corso degli anni si è riscontrato un aumento considerevole della richiesta di consolidamenti di edifici interessati da dissesti e stati fessurativi rilevanti ed agli ingegneri è stato richiesto sempre più frequentemente di cimentarsi con questi problemi, spesso assai complessi. Le cause di questi fenomeni fessurativi sono da imputarsi, nella maggior parte dei casi, al manifestarsi di cedimenti differenziali generati da ampliamenti o modifiche apportate al corpo di fabbrica e dalle variazioni nella distribuzione dei carichi permanenti applicati; in altre circostanze la causa dei cedimenti va ricercata nella variazione delle proprietà geotecniche dei terreni di fondazione, dovute, ad esempio, ad un abbassamento od innalzamento della falda freatica, alla degradazione chimica di alcuni litotipi od alla rottura d'impianti idraulico-sanitari.

Il miglioramento delle proprietà meccaniche di un terreno di fondazione può divenire a volte necessario quando devono essere realizzate delle modifiche in strutture esistenti, quali sopra-elevazioni o variazioni della struttura portante.

2. Miglioramento delle caratteristiche del terreno utilizzando la tecnologia URETEK

Il metodo Uretek Deep Injections® è una tecnologia di intervento che mediante l'esecuzione di iniezioni localizzate di una particolare resina ad alta pressione d'espansione, determina un notevole miglioramento delle proprietà geotecniche del terreno di fondazione.

La fase operativa, per il consolidamento di fondazioni di strutture nuove o già esistenti, è relativamente semplice e non necessita di scavi invasivi o di complicate opere di solidarizzazione.

Subito dopo aver eseguito le iniezioni nel terreno, la resina espande. La pressione, sviluppata dalla resina nella sua fase d'espansione, dapprima consolida il terreno circostante dopodiché solleva la struttura sovrastante; il sollevamento è costantemente monitorato con apparecchiatura laser costituita da un emettitore e da ricevitori, fissati alle strutture sotto le quali sono eseguite le iniezioni.

E' stata realizzata recentemente una vasta gamma di test di laboratorio sulla resina Uretek per misurarne le principali proprietà meccaniche [1]. Sono state realizzate prove di compressione verticale con espansione laterale libera e d'espansione verticale in condizioni edometriche presso il laboratorio geotecnico dell'Università di Padova.

Le prime sono state condotte su provini cubici di lato pari a 50 mm, in accordo con quanto prescritto dalla Normativa UNI 6350-68 "Materie plastiche cellulari rigide – Determinazione delle caratteristiche a compressione". I risultati ottenuti, facendo variare opportunamente il peso di volume γ della resina, evidenziano come la resistenza a compressione σ aumenti velocemente con γ (Fig.1). Si osserva inoltre

come a valori molto contenuti del peso di volume ($0.5 \div 3.5 \text{ kN/m}^3$) corrispondano resistenze alla compressione piuttosto elevate ($0.25 \div 6.50 \text{ MPa}$) ed in ogni modo ampiamente sufficienti per opporsi alle tensioni presenti nel terreno. Per quel che concerne il modulo d'elasticità secante E , le prove hanno consentito di individuare valori compresi tra $15 \div 80 \text{ MPa}$, confrontabili con i valori caratteristici dei terreni alluvionali. Ciò significa che in un terreno sottoposto a trattamento con resina la rigidezza media dell'ammasso non subisce variazioni significative e quindi non si dovranno attendere ridistribuzioni anomale delle tensioni applicate.

Le prove per la determinazione dell'espansione in condizioni edometriche sono state condotte utilizzando un'apposita apparecchiatura che consente l'iniezione della resina all'interno di un cilindro metallico rigido, provvisto di pistone. Immediatamente dopo l'iniezione, la resina inizia l'espansione che, a causa dell'elevata rigidezza del contenitore, è consentita solamente in direzione verticale. La pressione d'espansione è stata assunta pari alla pressione necessaria ad impedire al pistone di muoversi verso l'alto. Si è osservata, come in precedenza, la dipendenza della pressione di rigonfiamento dalla densità della resina (Fig.2). Sono stati misurati valori di pressione d'espansione compresi tra $0.2 \div 10.0 \text{ MPa}$, nel campo indagato di pesi di volume ($\gamma = 0.5 \text{ kN/m}^3 \div 10.0 \text{ kN/m}^3$). Tali valori sono indicativi della pressione che la resina può generare qualora essa venga iniettata nel terreno.

Lo stato di tensione del terreno ospitante, determina la pressione d'espansione alla quale la resina completa la reazione di polimerizzazione. Il peso di volume solido della resina ed il suo grado d'espansione volumetrica misurati al termine del processo, sono entrambi funzione di tale valore di pressione. Qualora la reazione di polimerizzazione avvenga in ambiente privo di confinamento (aria libera), la resina solidifica con un peso di volume pari a 0.4 kN/m^3 con un grado d'espansione volumetrica pari a 30.

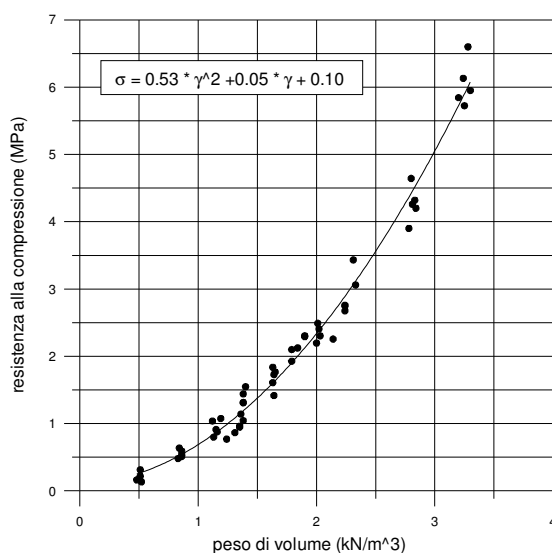


Figura 1 – Prova di compressione verticale con espansione laterale libera: andamento della tensione verticale σ in funzione del peso di volume γ del provino

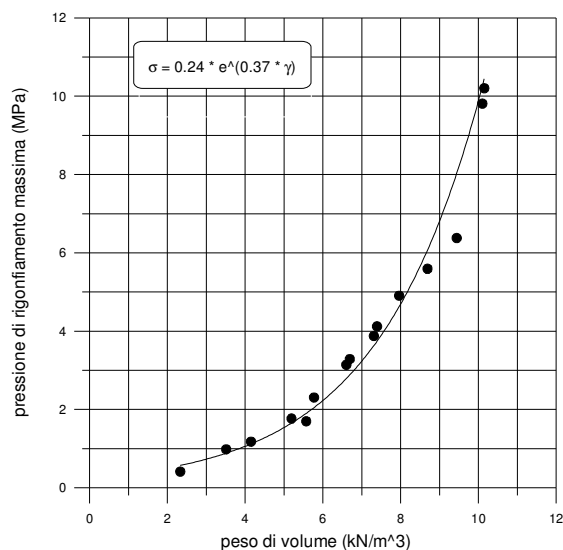


Figura 2 – Prova di rigonfiamento in condizioni edome-triche: andamento della pressione massima di rigonfiamento in funzione del peso di volume del provino

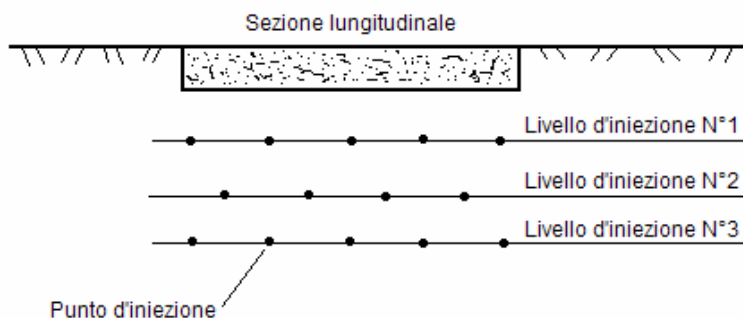


Figura 3: Rappresentazione schematica del metodo d'iniezione Uretex

3. Inquadramento teorico e simulazione del processo d'espansione

Il processo di espansione della resina, iniettata puntualmente all'interno del terreno (Fig.3), si presta ad essere interpretato attraverso la teoria dell'espansione di una cavità di forma sferica (o cilindrica, se si tratta di più iniezioni ravvicinate disposte lungo un asse verticale) in condizioni quasi-statiche.

Il terreno viene caratterizzato come un mezzo elasto-perfettamente plastico con criterio di rottura non associato alla Mohr-Coulomb ed è inizialmente considerato soggetto ad uno stato di tensione isotropo, con pressione p_0 uguale a:

$$p_0 = \frac{1 + 2 \cdot K_0}{3} \cdot \sigma_{v0} + dp$$

dove K_0 è il coefficiente di spinta laterale a riposo e $dp = q_0 \cdot I_c \cdot [(B/L), z]$ indica l'incremento di pressione dovuto alla fondazione (dimensioni $B \times L$; fattore d'influenza I_c), calcolato alla profondità d'iniezione z secondo la teoria di Boussinesq.

La pressione verticale iniziale (σ_{vo}), calcolata alla profondità d'iniezione z , è uguale alla pressione totale in presenza di materiali coesivi ($c_u \neq 0$; $\varphi = 0$) ed alla pressione efficace in presenza di materiali granulari ($\varphi \neq 0$, $c_u = 0$).

I parametri del terreno considerati nel modello sono:

- il modulo di Young (E) ed il coefficiente di Poisson (ν) per la caratterizzazione del comportamento elastico del terreno;
- la coesione (c) o la resistenza al taglio non drenata (c_u);
- l'angolo di resistenza al taglio (φ);
- l'angolo di dilatanza (ψ) è posto uguale a zero, poiché generalmente i problemi di cedimento sono associabili alla presenza di formazioni granulari di densità da sciolta a molto sciolta;

Le proprietà geometriche della cavità e le regioni elastica e plastica sono, con riferimento alla (Fig.4):

- r_a raggio della cavità, si assume un valore iniziale $r_{a0} = 0.006$ m;
- r_b raggio della zona plastica, rappresenta il confine tra la zona plastica e la zona elastica;

r_c raggio d'influenza dell'iniezione, distanza oltre la quale lo stato tensionale agente (σ_c) è tale per cui $(\sigma_c - p_o) \leq 0.01 p_o$.

Durante la prima parte del processo d'espansione, all'aumentare della pressione all'interno della cavità, il terreno rimane inizialmente in campo elastico. Al raggiungimento di un determinato valore della pressione interna, iniziano le deformazioni plastiche. Al progredire del processo la zona plastica si espande e così quella elastica, fino al raggiungimento della pressione limite (σ_{lim}).

Il processo d'espansione è trattato teoricamente secondo la teoria proposta da Yu e Holubny [2] adottando un'analisi alle grandi deformazioni nella zona plastica ed alle piccole deformazioni nella zona elastica.

In tale ambito il rapporto (r_a / r_{a0}) tra il raggio della cavità sotto l'azione della generica pressione p ed il raggio iniziale della cavità è esprimibile attraverso la seguente relazione:

$$\frac{r_a}{r_{a0}} = \left\{ \frac{R^{-\gamma}}{(1-\delta)^{(\beta+m)/\beta} - (\gamma/\eta) \cdot \Lambda_1(R, \xi)} \right\}^{\beta/(\beta+m)} \quad (1)$$

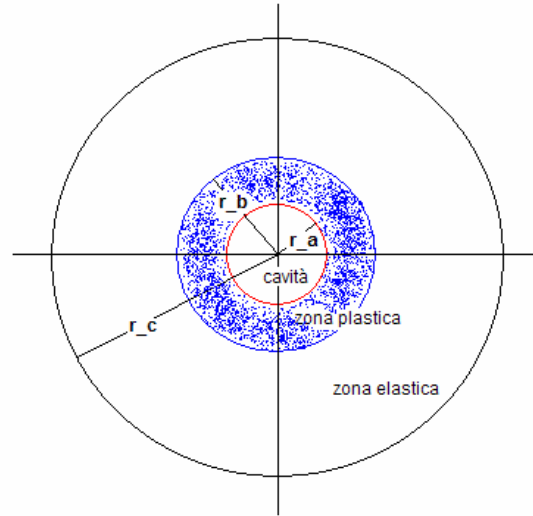


Figura 4 – Rappresentazione schematica delle zone plastica ed elastica che circondano la cavità

Dove con R s'indica il rapporto di pressione della cavità pari a:

$$R = \frac{(m + \alpha) \cdot [Y + (\alpha - 1) \cdot p]}{\alpha \cdot (1 + m) \cdot [Y + (\alpha - 1) \cdot p_o]} \quad (2)$$

Il coefficiente m è pari ad 1 nel caso di cavità di forma cilindrica ed a 2 nel caso di forma sferica. Le definizioni analitiche $G, Y, \alpha, \beta, \gamma, \delta, \eta, \xi, \Lambda$ sono le stesse proposte da Yu ed Houlsby (1991):

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}; \quad Y = \frac{2 \cdot c \cdot \cos(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)}; \quad \alpha = \frac{1 + \sin(\varphi)}{1 - \sin(\varphi)};$$

$$\beta = \frac{1 + \sin(\psi)}{1 - \sin(\psi)}; \quad \gamma = \frac{\alpha \cdot (\beta + m)}{m \cdot (\alpha - 1) \cdot \beta}; \quad \delta = \frac{Y + (\alpha - 1) \cdot p_o}{2 \cdot (m + \alpha) \cdot G}$$

$$\eta = \exp\left(\frac{(\beta + m) \cdot (1 - 2 \cdot \nu) \cdot [Y + (\alpha - 1) \cdot p_o] \cdot [1 + (2 - m) \cdot \nu]}{E \cdot (\alpha - 1) \cdot \beta}\right)$$

$$\xi = \frac{[1 - \nu^2 \cdot (2 - m)] \cdot (1 + m) \cdot \delta}{(1 + \nu) \cdot (\alpha - 1) \cdot \beta} \left[\alpha \cdot \beta + m \cdot (1 - 2 \cdot \nu) + 2 \cdot \nu - \frac{m \cdot \nu \cdot (\alpha + \beta)}{1 - \nu \cdot (2 - m)} \right]$$

$$\Lambda_1(x, y) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n^1 \quad A_n^1 = \begin{cases} \frac{y^n}{n!} \ln(x) & \text{if } n = \gamma \\ \frac{y^n}{n! (n - \gamma)} [x^{n-\gamma} - 1] & \text{if } n \neq \gamma \end{cases}$$

Mentre il rapporto r_b / r_a tra il raggio della zona plastica e il raggio della cavità è esprimibile come:

$$\frac{r_b}{r_a} = R^{\alpha / [m \cdot (\alpha - 1)]} \quad (3)$$

Il valore della pressione limite (σ_{lim}) si ottiene ponendo $(r_a/r_{a0}) \rightarrow \infty$ e quindi eguagliando a zero il termine al denominatore della (1).

Nell'analisi s'ipotizza che l'espansione della resina provochi in ogni caso il raggiungimento della pressione limite, quindi si procede alla determinazione del volume di resina da iniettare, in relazione al raggio d'influenza (r_c) dell'iniezione che si desidera ottenere. Conseguentemente, imponendo un determinato valore di r_c è possibile determinare il raggio della cavità (r_a), il raggio della zona plastica (r_b) e la tensione radiale all'interfaccia plastica-elastica (σ_b).

L'approccio teorico di Yu e Houlsby (1991) può essere integrato con valutazioni empiriche tratte da back-analysis di numerosi casi pratici.

Nel calcolo del volume da iniettare (V_{ri}), si considera che parte del volume della resina post-espansione o finale (V_{rf}) occupi la cavità, mentre la restante penetri nella zona plastica, secondo una percentuale volumetrica dipendente dalla tipologia del terreno.

Calcolato quindi il volume della resina post-espansione, il volume iniettato può essere determinato sperimentalmente come una funzione di V_{rf} e σ_{lim} .

Si possono valutare le modifiche indotte dall'espansione, sui parametri di resistenza del terreno, alla profondità d'iniezione. Tali parametri si riferiscono alla resistenza penetrometrica statica (q_c) ed alla resistenza al taglio non drenata (c_u) ottenute da una prova CPT. Nel caso di materiale granulare si considera che l'aumento della resistenza penetrometrica statica sia attribuibile solamente all'aumento delle tensioni effettive, in quanto si assume che la sola espansione non sia in grado di modificare sostanzialmente l'angolo di resistenza al taglio del materiale.

Le modifiche di resistenza sono valutate con riferimento alla variazione di pressione indotta dall'iniezione, secondo le espressioni sotto riportate:

terreni coesivi: $\frac{c_u}{\sigma'_v} = 0.22 \cdot OCR^{0.8}; \quad q_c = 20 \cdot c_u + \sigma_v$

terreni granulari: $q_c = \sigma'_v \cdot e^{5.241 \cdot \tan(\varphi)}$

Il valore σ'_v è calcolato ad una distanza dal centro della cavità pari alla distanza tra l'asse della fondazione e la verticale di prova, ed alla profondità dell'iniezione.

La qualità delle previsioni fornite dal modello è stata finora verificata su un buon numero di casi reali. È evidente come l'attendibilità delle previsioni teoriche cresca con la qualità dell'indagine geotecnica a disposizione del progettista dell'intervento di consolidamento.

4. Descrizione di un caso reale

L'efficacia del modello teorico è stata verificata, per mezzo di test ed analisi successive all'intervento, in più di venti cantieri eseguiti da Uretek negli ultimi diciotto mesi.

L'obiettivo principale della campagna sperimentale è stato quello di valutare lo scostamento della resistenza penetrometrica alla punta misurata in sito da quella calcolata teoricamente.

L'utilizzo a posteriori del modello, basato su quantità di resina iniettata reali, ha permesso di calcolare un valore atteso della resistenza penetrometrica alla punta relativa ad una prova CPT (q_{c-new}); tale valore è stato poi confrontato con un valore $q_{c-field}$ ottenuto attraverso correlazioni note in letteratura dal valore della resistenza alla punta di una prova penetrometrica media realizzata in situ.

Per facilitare la comprensione del metodo sopra esposto, s'illustra un interessante caso, riferito al miglioramento del terreno di fondazione di un fabbricato ex-rurale ubicato nel comune di San Giovanni d'Asso in provincia di Siena, interessato da un diffuso quadro fessurativo nella sua struttura in elevazione. L'edificio, ubicato in zona collinare caratterizzata da forme di rilievo tondeggianti ed incisioni vallive accentuate, è situato su un versante con pendenza media di circa il 20%. Lo stesso è costituito da un nucleo principale risalente probabilmente al secolo scorso e da un corpo di fabbrica secondario, più recente, realizzato in adiacenza al corpo di fabbrica principale. La struttura disposta su un piano fuori terra ed un seminterrato, è dotata di forma rettangolare in pianta, delle dimensioni di 7,40 m x 11,50 m.

I dissesti erano concentrati in particolare nella zona di monte nella porzione di fabbricato di recente costruzione con tendenza a diminuire progressivamente verso valle.

Nell'area interessata dallo studio, caratterizzata dalla presenza di terreni argillosi poco permeabili e non interessata da flussi d'acqua sotterranei, sono state eseguite tre prove penetrometriche statiche (CPT1, CPT2 e CPT3) ed un sondaggio (BH1) (Fig.5). In base ai risultati dell'indagine geognostica effettuata, il terreno di fondazione può essere distinto in due unità litotecniche principali (Fig. 6):

Unità Aa – Argille limose alterate: rappresenta il terreno d'imposta delle fondazioni del fabbricato. Dotata di uno spessore variabile da 2,00 m a 4,00 m nel lato di monte e di circa 3,00 m in quello di valle ha valori di resistenza molto variabili in funzione dei gradi d'alterazione e d'umidità.

Considerata la sua resistenza penetrometrica alla punta minima, pari a $q_{cmin} = 2$ MPa, per l'unità Aa è ipotizzabile una resistenza al taglio non drenata pari a $c_u = 85$ kPa ed un modulo di compressibilità edometrico $E_{ed} = 5$ MPa.

Unità Ac – Argille limose compatte: rappresenta il substrato dell'area di studio, presente sotto le argille alterate da una profondità variabile da 2,00 m a 4,00 m. È costituita da argille limose sovraconsolidate, il cui grado di consistenza tende ad aumentare progressivamente con la profondità. Considerata la sua resistenza penetrometrica alla punta minima, pari a $q_{cmin} = 5$ MPa, per l'unità Ac è ipotizzabile una resistenza al taglio non drenata pari a $c_u = 220$ kPa ed un modulo di compressibilità edometrico $E_{ed} = 15$ MPa.

Prima dell'inizio dei lavori d'iniezione si sono realizzate tre prove penetrometriche dinamiche (DPM1, DPM2 e DPM3) realizzate con un penetrometro avente massa battente pari a 300 N ed altezza di caduta di 0.2 m (DPM 30) con l'intento di calibrare lo strumento rispetto alle prove statiche; si è determinata la seguente correlazione tra la resistenza penetrometrica statica q_c e dinamica R_{pd} .

$$R_{pd} = \alpha \cdot q_c \quad \text{con} \quad \alpha = 1.4$$

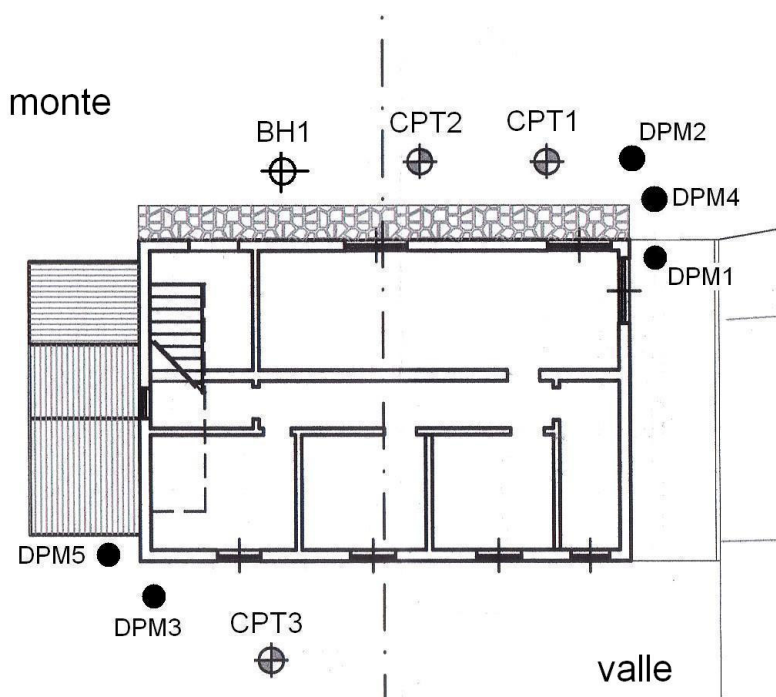


Figura 5 – Planimetria dell'edificio ed ubicazione prove in situ

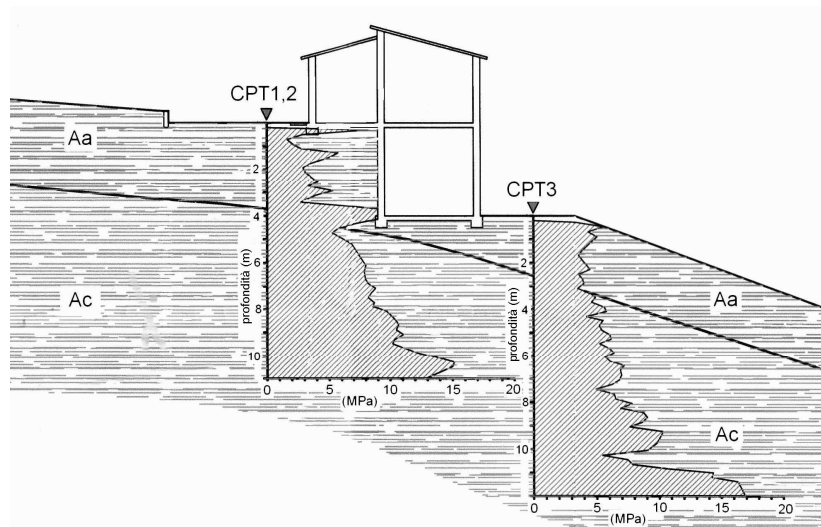


Figura 6 – Profilo del terreno e risultati prove CPT iniziali

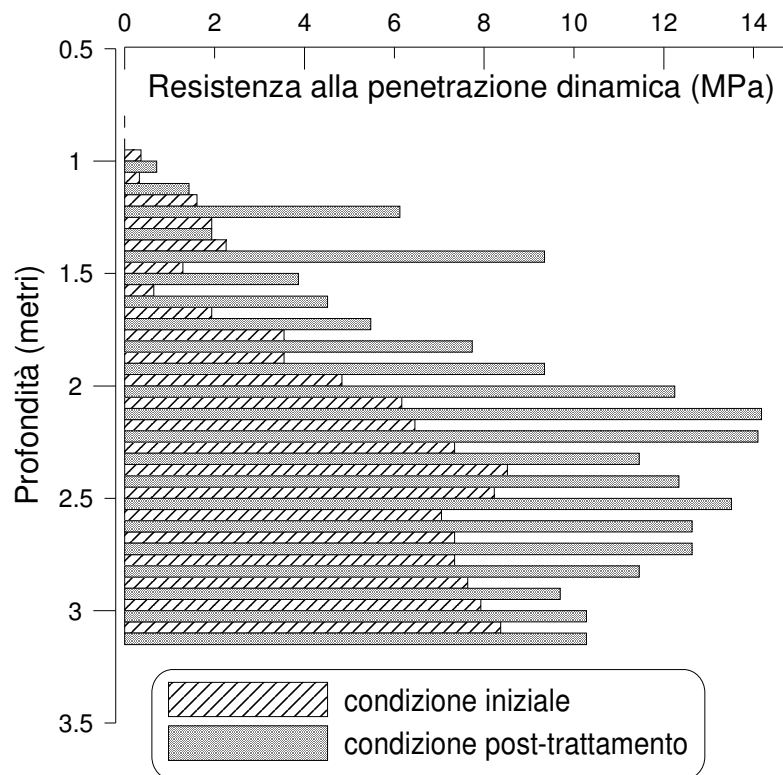


Figura 7 – Grafico comparative prove DPM1 e DPM4 realizzate prima e dopo il trattamento

Il consolidamento di complessivi 24 m lineari di fondazione continua, è durato complessivamente tre giorni lavorativi durante i quali si sono iniettati mediamente 20 dm³ di resina inespansa per punto iniettato.

Il passaggio finale della sperimentazione è consistito nel controllo dei risultati ottenuti, attraverso l'esecuzione d'ulteriori due prove penetrometriche dinamiche (DPM4 e DPM5, vedi Fig. 5).

In Figura 7 sono rappresentate le resistenze penetrometriche dinamiche, R_{pd} , registrate prima e dopo il trattamento, derivate dai risultati delle prove DPM1 e DPM4. In seguito al miglioramento del terreno, gli incrementi di R_{pd} sono anche superiori al 100%, particolarmente fino alla profondità di 2 m, dove le prove CPT hanno fatto registrare i valori più bassi di q_c .

A questo punto è stato possibile confrontare i valori teorici di resistenza alla punta del penetrometro statico, (q_{c-new}), ottenuti dalla modellazione, con i valori registrati in situ prima del trattamento (q_{c-old}), e dopo il trattamento ($q_{c-field}$). In questo caso specifico si sono registrati i seguenti valori:

$$q_{c-old} = 2498 \text{ kPa} \quad q_{c-field} = 4820 \text{ kPa} \quad q_{c-new} = 4355 \text{ kPa}$$

I risultati evidenziano come gli incrementi del valore di q_c , dovuti al miglioramento delle caratteristiche del terreno ($q_{c-field} - q_{c-old}$), siano maggiori del 90%, mentre il valore calcolato analiticamente q_{c-new} è inferiore del 10% alla q_c reale misurata dopo il trattamento $q_{c-field}$.

Questo procedimento comparativo, è stato portato a termine in numerosi cantieri realizzati da Uretek (Fig.8). L'accuratezza dei risultati calcolati è assai soddisfacente per un campo di valori della resistenza penetrometrica statica iniziale q_{c-old} compreso tra 2 MPa e 4 MPa. In queste condizioni iniziali, comprendenti la maggior parte dei terreni trattati con la tecnica di miglioramento dei terreni Uretek, il valore calcolato q_{c-new} sembra corrispondere in larga misura al valore sperimentale post trattamento $q_{c-field}$.

Al di fuori di questi limiti ($q_{c-old} = 2 \text{ MPa}-4 \text{ MPa}$) il modello analitico necessita ancora d'affinamenti. Gli sviluppi futuri del software comprenderanno la possibilità di gestire, ad esempio, l'effetto del riempimento dei vuoti nei terreni granulari e l'effetto d'iniezioni multiple sovrapposte, al fine di coprire un campo, il più vasto possibile, d'applicazioni per le quali la tecnologia si presta.

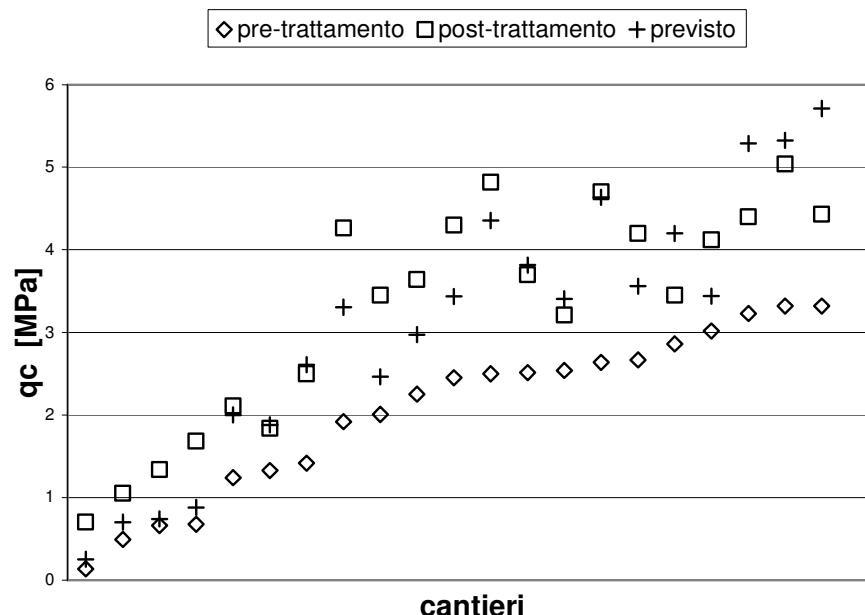


Figura 8 – Comparazione tra valori di q_c registrati prima e dopo il miglioramento del terreno e calcolati con il modello analitico.

5. Conclusioni

I punti principali ai quali dare maggior rilievo sono i seguenti:

Il metodo Uretek Deep Injections[®] utilizza una particolare resina, capace d'espandersi immediatamente dopo essere stata iniettata, la quale sviluppa un'elevata pressione d'espansione sul terreno circostante; il modulo di rigidezza varia tra 15 ed 80 MPa, ed è quindi paragonabile con i moduli relativi a terreni alluvionali; la pressione d'espansione varia tra 0.2 e 10.0 MPa nell'intervallo di peso di volume investigato (compreso fra $\gamma = 0.5 \text{ kN/m}^3$ e 10.0 kN/m^3);

Il processo d'espansione della resina è stato modellato con la teoria dell'espansione della cavità sferica (o cilindrica) in condizioni quasi-statiche. Il terreno è stato considerato come un materiale elastico lineare perfettamente plastico, con un criterio di rottura non associato alla Mohr-Coulomb ed inizialmente soggetto ad uno stato di tensione isotropo. Dopo un'espansione iniziale di tipo elastico della cavità, hanno inizio le deformazioni plastiche fino al raggiungimento della pressione limite;

L'approccio teorico (Yu & Houlsby) è stato integrato con valutazioni sperimentali derivanti da prove di laboratorio su campioni di resina e back-analysis di numerosi casi reali; sono state valutate le variazioni nei parametri del terreno mediante la comparazione dei valori teorici della resistenza penetrometrica statica, ($q_{c\text{-new}}$), con i valori delle prove in situ corrispondenti alla resistenza pre-trattamento ($q_{c\text{-old}}$) e post-trattamento ($q_{c\text{-field}}$);

Questa procedura comparativa, è stata portata a termine in più di venti cantieri. I risultati calcolati sembrano corrispondere in larga misura a quelli misurati dopo il

trattamento, in particolare qualora la resistenza penetrometrica statica pre-trattamento q_{c-old} sia compresa tra 2 MPa e 4 MPa.

6. Bibliografia

- [1] Favaretti M., Germanino G., Paschetto A., Vinco G., 2004. *Interventi di consolidamento dei terreni di fondazione di una torre campanaria con iniezioni di resina ad alta pressione d'espansione*, XXII Convegno Nazionale di Geotecnica, Palermo, Italia.
- [2] Yu H.S., Houlsby G.T., 1991. *Finite cavity expansion in dilatant soils: loading analysis*. Géotechnique, 41 (2), 173-183.