

MODELLAZIONE NUMERICA DI UN INTERVENTO DI CONSOLIDAMENTO DEL TERRENO DI FONDAZIONE DI UN PALAZZO STORICO SITO IN RUE JOSEPH DE MAISTRE SULLA COLLINA DI MONTMARTRE IN PARIGI REALIZZATO CON INIEZIONI DI RESINA POLIURETANICA AD ALTA PRESSIONE D'ESPANSIONE

Mansueto F.

Studio Montaldo & Associati, Genova

Gabassi M., Paschetto A., Vinco G.

Uretek S.r.l.

.....<

SOMMARIO

Sito nello storico 18esimo arrondissement nei pressi della basilica del Sacro Cuore sulla collina di Montmartre, l'edificio oggetto di questo studio è stato interessato da importanti cedimenti delle fondazioni in corrispondenza di un muro di spina longitudinale. Visto il contesto storico e l'alto pregio dell'immobile lo stesso è stato oggetto di approfonditi studi supportati da indagini geotecniche in situ comprendenti prove penetrometriche e pressiometriche. Dopo aver vagliato le possibili tecnologie, idonee a stabilizzare il fabbricato, si è optato per le iniezioni di resina espandente. L'intervento ha permesso il ripristino della staticità e della funzionalità dell'edificio, nonché l'arresto dell'evoluzione dei cedimenti. Sulla base dei dati a disposizione, utilizzando un software dedicato realizzato implementando la teoria dell'espansione della cavità sferica ed un codice di calcolo agli elementi finiti, si è condotta una modellazione numerica "a posteriori" dell'intervento, che ha messo in evidenza aspetti interessanti inerenti alla simulazione del comportamento di un terreno trattato con resine ad alta pressione d'espansione.

Parole chiave: resine, modellazione, cedimenti, software di calcolo, elementi finiti.

1 PREMESSA

La presente memoria è volta ad illustrare lo stato dell'arte in materia di previsione del miglioramento delle caratteristiche geotecniche e di modellazione del comportamento del terreno trattato con iniezioni di resina poliuretanica ad alta pressione di rigonfiamento.

Attraverso l'analisi "a posteriori" di un cantiere realizzato in Francia, si vogliono mettere in luce le corrispondenze tra l'effetto delle iniezioni misurato in situ e la sua stima ottenuta da una modellazione realizzata combinando un software di calcolo dedicato alle formule implicite ed uno agli elementi finiti. I controlli empirici realizzati in corso d'opera monitorando il sollevamento dell'edificio e le prove geotecniche comparative realizzate prima e dopo l'intervento, a diverse distanze dall'asse d'iniezione, sono servite oltre che a verificare il risultato ottenuto, anche a tarare il modello da utilizzarsi nell'analisi.

2 INQUADRAMENTO STORICO

Con i suoi 130 metri, la collina di Montmartre è il punto più alto di Parigi, nella zona Nord della città.

Di origini rurali, la zona fu inglobata nella città a metà dell'Ottocento; l'epoca d'oro di Montmartre si colloca tra la fine del XIX secolo e la prima guerra mondiale, quando

gli affitti bassi attirarono gli artisti che crearono il mito bohémien di Montmartre.

All'interno di questo contesto, e precisamente sul versante Sud Ovest della collina, è ubicato l'edificio storico risalente al XIX secolo oggetto di questa memoria.

3 ORIGINE DEI DISSESTI

Durante la campagna d'indagini geognostiche, è stata individuata la causa dei dissesti. Il cedimento del terreno, con conseguente decompressione dell'interfaccia terreno-fondazione, si è verificato in conseguenza ad un fenomeno di dilavamento provocato da una perdita nella rete fognaria proseguita per un lungo periodo di tempo.

3.1 Descrizione del quadro fessurativo

Sono state rilevate delle fessurazioni strutturali passanti sul muro di spina longitudinale dell'edificio ed esclusivamente al piano cantina; in particolare, sulla parte superiore della muratura, si evidenziava una lesione sub-orizzontale che percorreva tutta la sua estensione abbassandosi a 45° in corrispondenza di un'apertura ad arco da un lato e verso il pavimento, con andamento scalinato tipico delle murature in laterizio, dall'altro.

Il quadro descritto è caratteristico di una fessura ad arco, indice di un abbassamento del terreno di fondazione, con la porzione compressa superiore del muro in

equilibrio e la porzione inferiore che tende a muoversi verso il basso per effetto del peso proprio.

4 CONDIZIONI GEOTECNICHE

La collina di Montmartre è caratterizzata da strati di riporto sovrapposti a livelli marnosi e gessosi ed è caratterizzata dalla presenza di cavità.

Durante la campagna d'indagini geognostiche in situ è stato possibile definire la successione degli strati dal piano di calpestio del livello cantina in giù.

È stata individuata la presenza di uno strato superiore degradato, con spessore variabile da 2,00 a 5,00 m, sovrapposto ad uno con caratteristiche migliori.

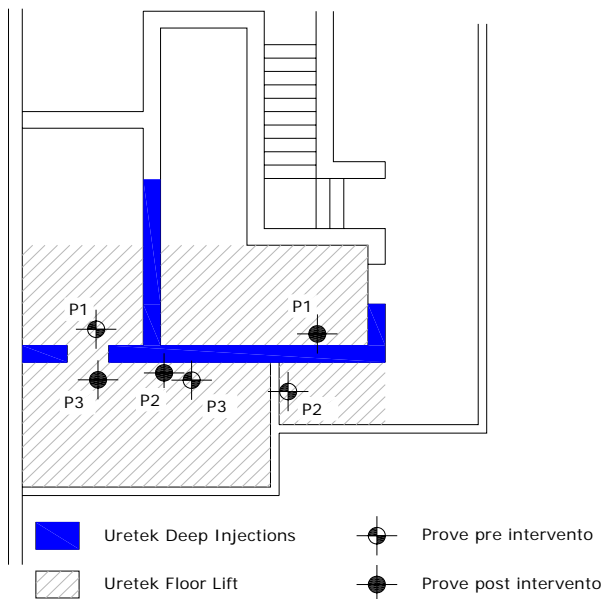


Figura 1. Ubicazione prove penetrometriche e pressiometriche

L'eterogeneità dei risultati ottenuti, conferma comunque la presenza di riporti, come indicato sulla carta geologica di Parigi 1/25.000 sulla quale è segnalata la presenza di riempimenti di cave a cielo aperto.

Essendo il piano d'imposta della fondazione alla profondità di 0,70 m dal piano di calpestio del livello interrato, dal quale sono state realizzate le indagini, è possibile affermare che il terreno di fondazione è costituito da riporto decompresso per una profondità variabile da 1,30 a 4,30 m. Lo stato di degrado, limitato allo strato superficiale, evidenzia come la causa dei dissesti sia localizzata e non coinvolga i livelli di terreno oltre il limite inferiore del riporto. L'origine dei dissesti, in conseguenza al lento degradarsi della parte superiore dello strato decompresso che fa d'appoggio alla base della fondazione, è in diretta correlazione con le perdite d'acqua che sono state rilevate all'interno della cantina e che interessano un volume piuttosto esteso di terreno anche lateralmente alla stessa ed in profondità. È probabile che

le suddette perdite siano durate per un lungo periodo di tempo aumentando progressivamente in seguito alla deformazione della fognatura causata dai cedimenti.

Le caratteristiche meccaniche dei terreni costituenti il VS dell'intervento sono state individuate grazie all'esecuzione di una campagna d'indagine così organizzata: sono state realizzate 5 prove penetrometriche dinamiche di tipo DPM30 ISSMFE e 5 prove pressiometriche Ménard spinte a varie profondità, durante le quali non è stata rilevata la presenza della falda. La figura 1 mostra l'ubicazione delle verticali di prova con riferimento alla zona sinistrata coincidente con quella oggetto di trattamento.

Le prove eseguite hanno dato i seguenti risultati:

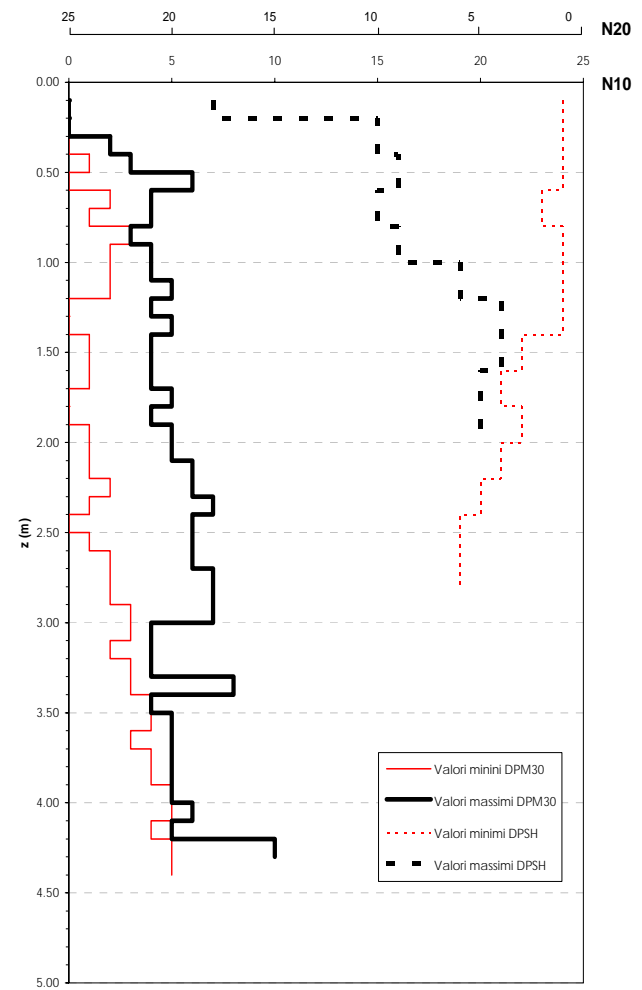


Figura 2. Grafici prove penetrometriche

La tipologia di prove eseguite non permette la determinazione precisa delle caratteristiche meccaniche dei terreni che individuano il VS dell'intervento, dovendo necessariamente ricavare i relativi parametri mediante l'impiego di correlazioni empiriche, si è quindi scelto di caratterizzarli mediante un approccio statistico.

La procedura impiegata è stata la seguente:

- Scelta della correlazione:

Tabella 1. Correlazioni impiegate.

	Prove Penetrometriche	Prove pressimetriche
E (kPa)	D'Appolonia et. Al (1970)	Amar et. Al (1991)
c' (kPa)		Amar et. Al (1991)
φ' (°)	De Mello (1971)	
Dr (%)	Terzaghi e Peck (1948)	

- Determinazione dei valori massimo e minimo attesi;
- Determinazione dei parametri di stato, di resistenza e di deformabilità per ogni set (max, min);

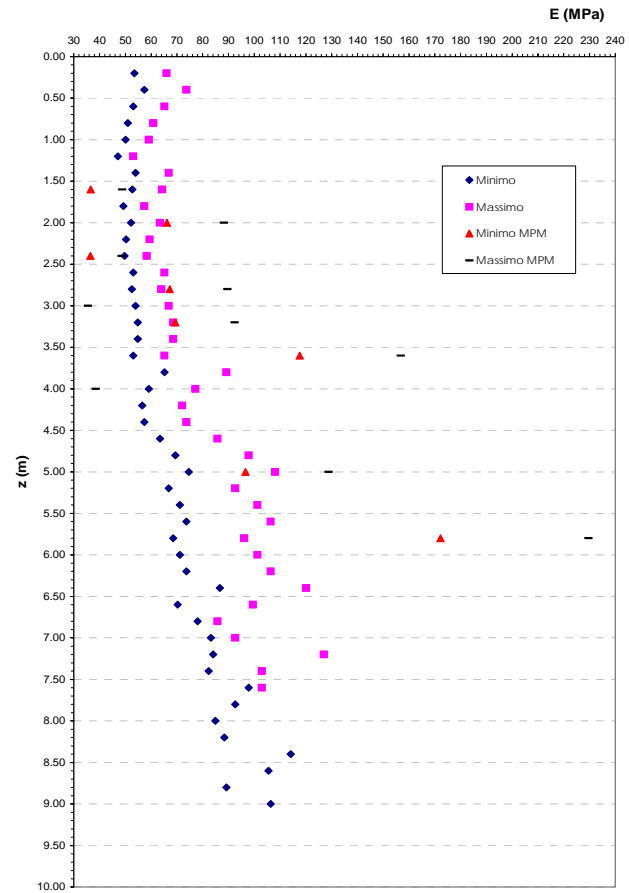


Figura 3. Modulo di deformabilità, valori massimi e minimi

- Costruzione delle curve di probabilità e determinazione dei valori medio e caratteristico e della deviazione standard;
- Determinazione del valore operativo mediante l'applicazione di un fattore di "incertezza" al valore caratteristico.

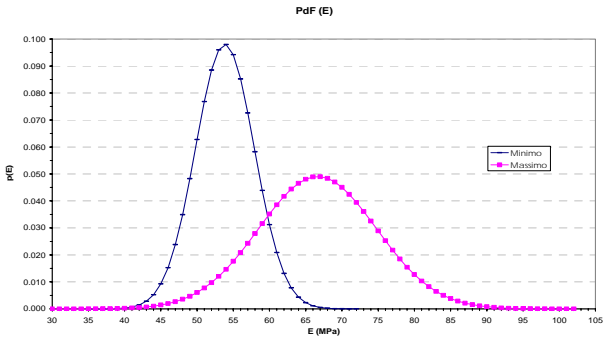


Figura 4. Curva di probabilità del modulo di deformabilità.

In figura 4 sono rappresentate le curve di probabilità statistica relative ai valori massimo e minimo del modulo di deformabilità, uno studio analogo è stato fatto anche per la determinazione dell'angolo di taglio e del grado d'addensamento.

L'impiego della metodologia descritta ha permesso di definire due strati di terreno, differenti per caratteristiche, poggianti sopra il substrato di base. I valori operativi ricavati sono riportati nelle tabelle 2 e 3.

Tabella 2. Caratterizzazione terreno 1

Parametro		Valor medio	Dev. Standard	Valore caratt.	Valore op.
φ' (°)	Min	34,9	0,8582	33,5	28
	Max	37,8	1,2137	35,8	30
Dr (%)	Min	49,3	6,1299	39,3	
	Max	69,7	8,6690	55,5	
E (MPa)	Min	53,0	2,1033	49,6	41,3
	Max	64,9	5,0813	56,6	47,2

Tabella 3. Caratterizzazione terreno 2

Parametro		Valor medio	Dev. Standard	Valore caratt.	Valore op.
φ' (°)	Min	34,0	0,7053	32,8	27
	Max	36,5	0,9974	34,8	29
Dr (%)	Min	42,8	5,0375	34,5	
	Max	60,5	7,1242	48,8	
E (MPa)	Min	53,8	4,0675	47,2	39,3
	Max	66,6	8,1349	53,3	44,4

Il primo strato di terreno, denominato terreno 1, è quello d'appoggio della fondazione ed ha potenza pari a ca. 1,0 m, mentre il secondo, denominato terreno 2, è sottostante con potenza pari a ca. 3,0 – 3,5 m e continua fino al tetto del substrato di base.

Si osserva che per profondità superiori il modulo di deformazione cresce quasi linearmente con la profondità come indicato nella figura 3.

5 INTERVENTI DI RIMEDIO

Gli interventi attuati, miravano ad annullare le conseguenze non ancora stabilizzate del dissesto e, nella misura possibile, a recuperare parzialmente i cedimenti differenziali; si è ritenuto requisito importante degli

interventi di rimedio la non interferenza diretta con le strutture murarie esistenti.

I danni sugli edifici sono direttamente imputabili alla variazione dello stato tensionale nel terreno, sul quale si è intervenuto, in un intorno limitato sotto alle fondazioni cedute.

Preventivamente al trattamento con iniezioni di resina è stato realizzato un allargamento della fondazione portandola ad una larghezza totale di 1,20 m, attraverso la costruzione di un cordolo in calcestruzzo armato.

L'intervento ha interessato il volume di terreno compreso tra il piano d'imposta della fondazione e la profondità di 4,50 – 5,00 m rispetto al piano di calpestio della cantina, utilizzato come piano di lavoro.

Si è scelto di intervenire esclusivamente con il metodo di consolidamento Uretex Deep Injections®, utilizzando una resina poliuretanica capace d'esercitare un'elevata pressione di rigonfiamento nel corso della sua espansione e con tempi di polimerizzazione estremamente rapidi che consentissero il contenimento della miscela iniettata all'interno del bulbo di terreno maggiormente interessato dalle tensioni indotte dai carichi in superficie.

5.1 Fasi d'iniezione

Il lavoro è stato realizzato tra l'8 e l'11 Luglio 2002 lungo 9,00 m lineari complessivi di fondazione e 20,00 m² di pavimentazione delle cantine con un consumo complessivo di 1.692 kg di materiale iniettato. Le operazioni sono state suddivise in tre fasi operative come segue:

- Prima fase: iniezioni direttamente sotto il piano d'imposta della fondazione per consolidare il terreno in corrispondenza dell'interfaccia e per riempire i vuoti eventualmente presenti; l'obiettivo della prima fase d'iniezioni è rimettere in coazione la fondazione riducendone così la sensibilità ai cedimenti. Le iniezioni sono state realizzate ad un'interasse pari a ca. 0,60 m alternativamente da una parte e dall'altra del muro e sono proseguite fino alla rilevazione, attraverso apposita strumentazione laser, di un inizio di sollevamento della struttura soprastante.
- Seconda fase: iniezioni in profondità all'interno del bulbo di terreno maggiormente interessato dalle tensioni indotte dai carichi superficiali. Le iniezioni sono state realizzate in corrispondenza dell'asse di perforazione delle iniezioni di prima fase su tre livelli di profondità alle quote di -2,00 -3,00 e -4,50 m dal piano di calpestio delle cantine.
- Terza fase: miglioramento del terreno d'appoggio del pavimento adiacente al muro di spina nel volume compreso tra quota -1,00 e -4,50 m dal piano di calpestio. Le iniezioni sono state eseguite su una maglia a quinconce ogni 1,00 m² ca. di superficie. Per il trattamento della pavimentazione si sono realizzate iniezioni colonnari con estrazione a velocità controllata del tubo d'iniezione a partire da quota -4,50 m dal piano di lavoro. Attraverso un monitoraggio di precisione è stato possibile conferire un sollevamento controllato alla pavimentazione che ha permesso la

pressoché totale eliminazione dei cedimenti differenziali.

5.2 Verifiche

L'analisi dei risultati delle prove pressiometriche post-intervento e la comparazione degli stessi con quelli delle prove pre-intervento ha evidenziato un netto miglioramento delle caratteristiche del terreno inizialmente molto scadenti.

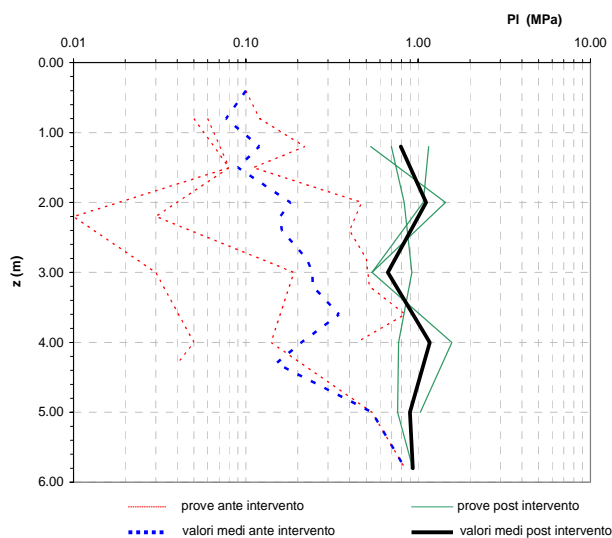


Figura 5. Confronto della pressione limite PI (MPa) tra prove pressiometriche ante intervento e post intervento.

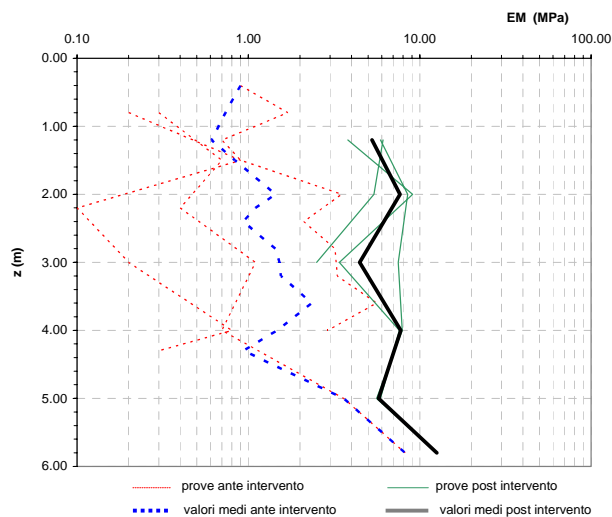


Figura 6. Confronto del modulo pressiometrico EM (MPa) tra prove pressiometriche ante intervento e post intervento.

Osservando tali grafici si evince che i valori pre-intervento si attestano tutti in un range abbastanza ampio mentre, al contrario, i valori post-intervento presentano scarti molto contenuti rispetto al valor medio, segno di un'omogeneizzazione conferita al terreno dalle iniezioni.

I valori delle pressioni limite e del modulo pressiometrico sono decisamente aumentati; in particolare, avendo misurato un valore medio della pressione limite pari a 0,86 MPa, è stato abbondantemente superato il valore minimo di progetto fissato dal progettista in 0,70 MPa. Si sono significativamente diminuita la compressibilità ed aumentata la capacità portante del terreno, portandole a livelli sufficienti da permettere, dopo un attento monitoraggio e l'attivazione dei nuovi elementi portanti, il progressivo smantellamento delle puntellature ed opere di sostegno provvisori, resi necessarie per permettere l'agibilità dello stabile. Il modulo pressiometrico, misurato dalle prove post-intervento, ha raggiunto il valore medio di 5,50 MPa, caratteristico di un terreno poco compressibile.

6 ANALISI NUMERICHE

Per modellare l'intervento è stato necessario ricorrere ad ovvie semplificazioni. Le iniezioni sono state così simulate con l'espansione volumetrica di elementi solidi.

Si è imposto un aumento della rigidità sia del volume trattato che del terreno al contorno; tale scelta è giustificata dagli aumenti misurati in situ sia in termini di rigidità che di resistenza del volume, limitato, di terreno trattato.

L'aumento di volume, modellato come isotropo, è ovviamente un'ulteriore semplificazione in quanto, in condizioni di terreno omogeneo, la pressione di rigonfiamento si svilupperà dapprima lungo il piano di minore tensione.

Durante la prima fase d'iniezione, in seguito all'espansione dei volumi iniziali di resina iniettata si saturano i vuoti presenti all'interno del terreno e si compatta lo stesso aumentandone la rigidità; in condizioni di terreno normal consolidato questo porta ad un aumento della tensione orizzontale fino a valori prossimi a quella verticale presente in un intorno limitato del punto d'iniezione.

Una volta raggiunto uno stato di tensione isotropo, la pressione di rigonfiamento si sviluppa anche in direzione verticale inducendo la struttura ad un inizio di sollevamento.

L'espansione isotropa della cavità sferica, implementata nel software dedicato alle formule implicite, è stata simulata con il codice di calcolo agli elementi finiti imponendo un valore della deformazione volumetrica dell'elemento, derivato dall'incremento di volume restituito dal software.

Così facendo è possibile stimare più accuratamente l'aumento di volume da inserire nel calcolo basandosi sui consumi registrati durante i lavori; i tempi estremamente rapidi del processo d'espansione impediscono infatti al materiale di percorrere più di qualche decimetro dal punto d'iniezione, rendendo agevole la stima dell'intorno raggiunto dalla resina.

Le analisi sono state condotte secondo due approcci limite: il primo volto a simulare la sola influenza del miglioramento delle caratteristiche del terreno post-iniezione, il secondo, più specifico, volto a simulare anche l'espansione di volume dell'iniezione.

Con l'impiego del software di calcolo dedicato alle formule implicite è stato possibile stimare l'aumento di rigidità indotto dalle iniezioni al terreno nell'intorno del punto d'iniezione, in funzione della quantità di materiale iniettato. I calcoli vengono realizzati implementando la teoria dell'espansione di una cavità sferica o cilindrica proposta da Yu e Houlsby (1991) accoppiata alla legge d'espansione del materiale iniettato, in funzione della tensione di confinamento, ottenuta in laboratorio. Con il medesimo software si sono calcolati anche i raggi d'influenza delle iniezioni che sono stati poi utilizzati nella modellazione con il codice di calcolo agli elementi finiti Plaxis® 2D Version 8.

6.1 Analisi FEM

Nel presente paragrafo sono riportati i risultati principali delle analisi FEM eseguite esponendo, prima, quelli relativi alla sola influenza del terreno trattato visto come "blocco" (Caso 1), e poi, quelli relativi all'espansione dei punti d'iniezione (Caso 2).

Nel primo caso si è adottato un legame costitutivo elasto plastico alla Mohr-Coulomb per entrambi i terreni mentre nel secondo caso si è scelto un legame costitutivo di tipo Hardening per meglio cogliere gli effetti legati alla ricomprensione indotta dall'espansione.

I parametri di resistenza e deformabilità impiegati nelle analisi sono quelli indicati nelle tabelle 2 e 3; l'influenza dell'iniezione di resina è stata caratterizzata ipotizzando che la sua presenza conferisca al terreno una coesione "virtuale" ed un incremento del modulo di deformabilità, lasciando invariato l'angolo di taglio del terreno naturale.

I valori operativi sono stati determinati sulla scorta della campagna d'indagine post-intervento. La simulazione del lavoro ha visto lo sviluppo delle fasi di calcolo riportate in tabella 4 per entrambi i casi studiati.

Il valore del carico applicato in fondazione, pari a 380 kPa, induce all'interfaccia fondazione-terreno una pressione media pari a circa 300 kPa riscontrata in sito.

Tabella 4. Sequenza delle fasi di analisi

Fase	Caso 1	Caso 2
Ko	X	X
Scavo	X	X
Costruzione fondazione	X	X
Applicazione dei carichi	X	X
Grado di Sicurezza Attuale	X	X
Allargamento Fondazione	X	X
Iniezione (blocco)	X	
Iniezioni (espansione) al 1° livello		X
Iniezioni (espansione) al 2° livello		X
Iniezioni (espansione) al 3° livello		X
Iniezioni (espansione) al 4° livello		X
Grado di Sicurezza Finale	X	X

Nelle pagine seguenti sono presentati i principali risultati relativi alla fase d'applicazione dei carichi (figure 7 e 8); in particolare si analizzano i diagrammi di taglio relativo e delle deformazioni incrementali di taglio:

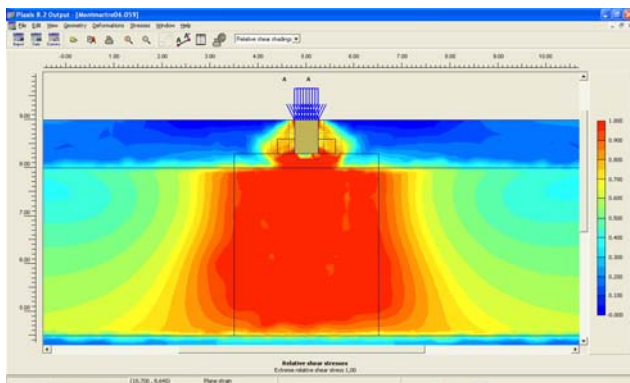


Figura 7. Diagramma del taglio relativo

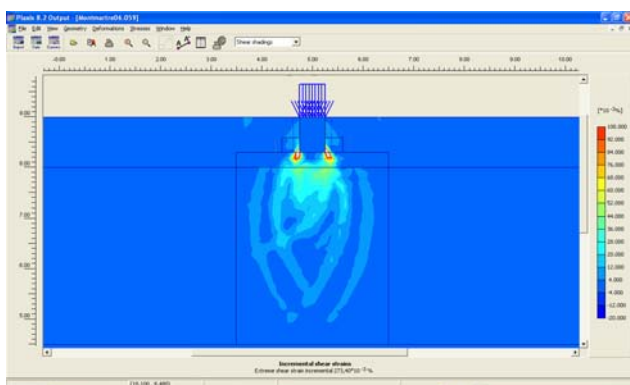


Figura 8. Deformazioni incrementali di taglio

Si osserva come l'azione dei carichi induca la mobilitazione di un meccanismo di punzonamento della fondazione entro il terreno di assise ben colto dal modello.

Esiste una vasta area, sviluppata entro gli strati 1 e 2, dove il criterio di rottura è raggiunto o è prossimo al raggiungimento, nella quale si mobilitano significativi stati deformativi di taglio.

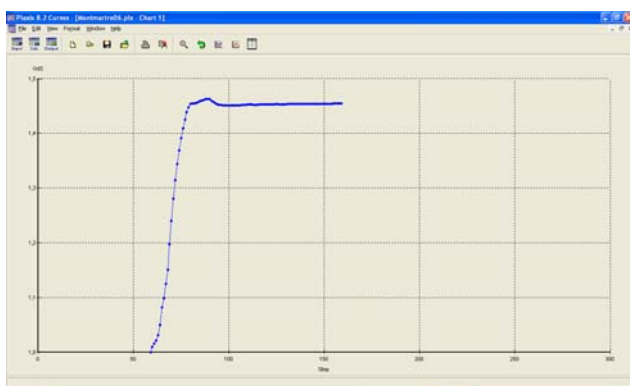


Figura 9. Grado di Sicurezza attuale

Tale mobilitazione è ovviamente imputabile alla mancata presenza di un cordolo fondazionale di dimensioni adeguate la cui presenza avrebbe avuto, senza dubbio, un benefico effetto.

Il valore del Grado di Sicurezza Attuale rilevato è pari a circa 1,4 ed è riportato in figura 9.

Caso 1

L'inserimento del terreno trattato come "blocco" ha prodotto il prevedibile effetto di decrementare le tensioni tangenziali agenti entro il VS migliorandone, quindi, il comportamento d'insieme.

La figura 10 mostra come il blocco di terreno migliorato presenti un comportamento caratterizzato da bassi sforzi tangenziali mentre, esternamente, lo stato tensionale risulti invariato rispetto all'assetto originario.

In termini di Grado di Sicurezza, rappresentato in figura 11, si osserva un suo significativo incremento rispetto alle condizioni ante-intervento rappresentate dalla linea rossa.

Le iniezioni hanno quindi prodotto il benefico (e prevedibile) effetto di incrementare il Grado di Sicurezza nei confronti della capacità portante, portandolo a 3,83.

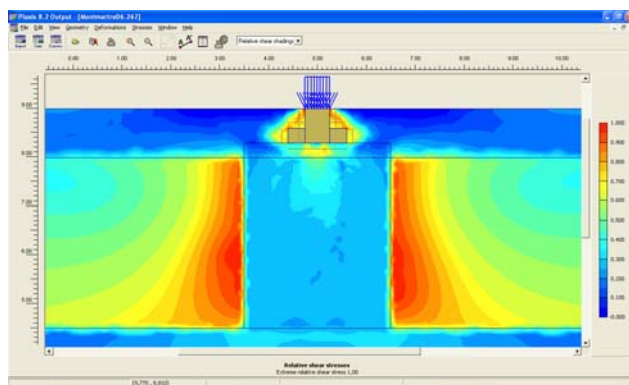


Figura 10. Diagramma del taglio relativo

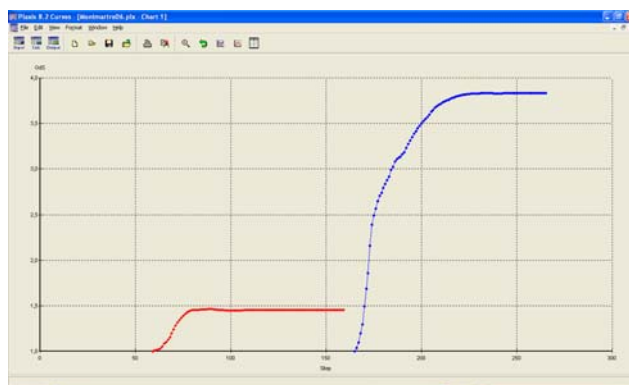


Figura 11. Variazione del Grado di Sicurezza

Caso 2

Questo caso analizza il comportamento del trattamento simulando l'espansione della resina.

La figura 12 mostra, con riferimento al primo livello d'iniezione, come l'espansione conferita ai cluster segua molto bene il comportamento atteso (sollevamento della fondazione).

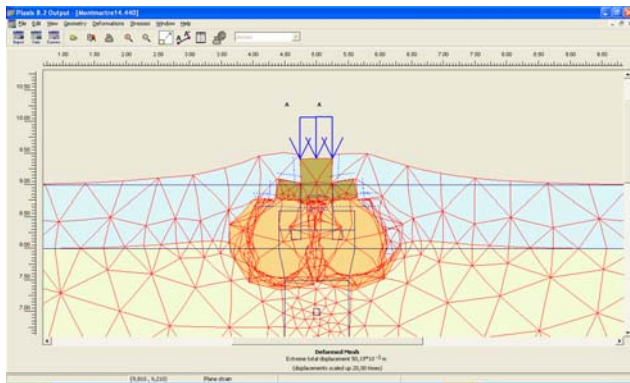


Figura 12. Espansione della resina e sollevamento

Infatti, in termini di risposta al sollevamento, si osserva come il maggior sollevamento coincida con il primo livello d'iniezione per poi tendere a valori più modesti agli altri livelli (figura 13).

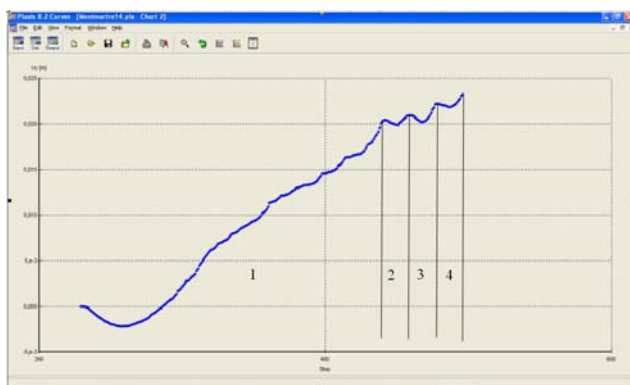


Figura 13. Spostamenti verticali della fondazione durante le fasi d'iniezione (i numeri indicano i livelli d'iniezione)

Da questa figura emerge anche un dato importante, ovvero la presenza di modesti abbassamenti riscontrati in ogni livello d'iniezione durante le varie fasi d'espansione. Tale fenomeno è probabilmente da imputarsi al rifluimento laterale del terreno in seguito all'espansione dell'elemento.

L'analisi dei punti di plasticità (figura 14), per i quali il criterio di rottura è raggiunto, mostra una buona convergenza con i risultati derivati dall'applicazione della teoria di Yu e Houlsby (1991). In particolare, la regione dei punti oltre la quale il criterio di rottura non è superato (raggio plastico) mostra una forma simile ad una circonferenza di raggio pari a circa 0,25 – 0,30 m contro i 0,20 – 0,30 m stimati con l'impiego della citata teoria, a conferma della buona congruenza dei due approcci.

Anche in questo caso le iniezioni hanno prodotto il benefico (e prevedibile) effetto di incrementare il Grado di Sicurezza nei confronti della capacità portante (linea blu) seppur a valori inferiori rispetto al caso precedente, rispetto alle condizioni ante-intervento (figura 15), aumentandolo fino al valore di 2,76.

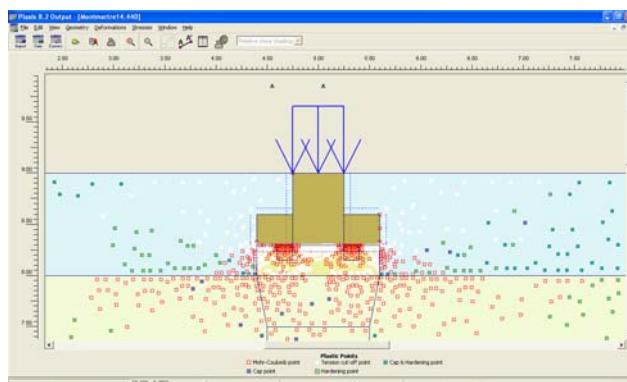


Figura 14. Punti di plasticità

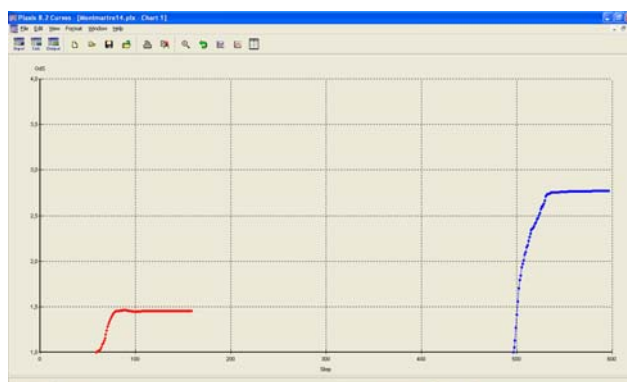


Figura 15. Variazione del Grado di Sicurezza

6.2 RISULTATI E CONCLUSIONI

La presente memoria ha affrontato gli aspetti della modellazione in risposta ad un trattamento di consolidamento del terreno, eseguito mediante iniezione di resine poliuretaniche ad alta pressione di espansione. Le prove post-intervento mostrano una buona omogeneizzazione del comportamento del terreno entro il volume trattato ed un notevole incremento di resistenza e rigidità rispetto ai valori iniziali. Il valore della pressione limite minima richiesta dal progettista post-intervento è stato raggiunto e superato, dimostrando la sostanziale efficacia della tecnologia adottata.

Basandosi sull'analisi "a posteriori" di un caso reale, si sono confrontate modellazioni condotte con due approcci differenti realizzati migliorando le caratteristiche costitutive del terreno sulla scorta dei risultati delle indagini, nel primo caso, e sfruttando l'applicazione della teoria di Yu e Houlsby (1991) implementando nell'analisi FEM i parametri relativi all'espansione ottenuti con il software alle formule implicite, nel secondo.

Come si è potuto osservare nel paragrafo precedente le analisi FEM hanno mostrato una buona convergenza con i risultati del software; è importante altresì sottolineare come quest'ultimo approccio fornisca i risultati del miglioramento in termini di caratteristiche di resistenza post-intervento mentre, mediante le analisi FEM, si siano potute seguire passo passo tutte le fasi di lavoro.

È evidente l'esistenza di una certa differenza tra i valori del Grado di Sicurezza, pari a circa il 38%, fra il Caso 1 ($GdS = 3.83$) ed il Caso 2 ($GdS = 2.76$) imputabile alle differenti metodologie d'approccio. Appare quindi sensato definire un fuso del Grado di Sicurezza le cui curve limite inferiore (Caso 2) e superiore (Caso 1) racchiudano il valore effettivo post-intervento (figura 16).

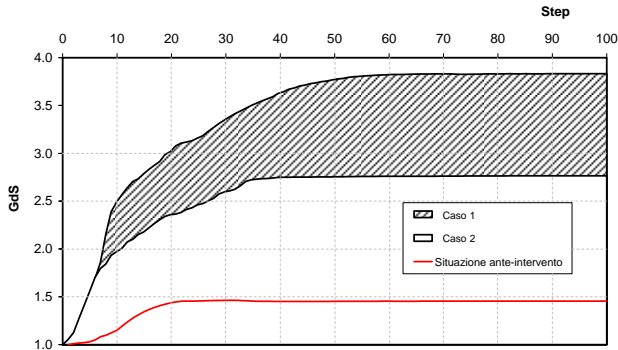


Figura 16. Fuso del Grado di Sicurezza

I principali risultati ottenuti mostrano una significativa convergenza fra i vari approcci impiegati e in particolare:

- La stima del raggio plastico, valutata con la teoria di Yu e Houlsby, è ben colta dalle analisi FEM (Caso 2);
- La simulazione FEM dell'espansione evidenzia importanti aspetti del sollevamento della fondazione, legati al rifluimento del terreno;
- Gli aspetti legati alla ricomprensione del terreno sono colti con sufficiente dettaglio;
- La variabilità del Grado di Sicurezza è contenuta e dipende dalle differenti metodologie d'analisi impiegate e dalle alea legate alla determinazione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità dalle sole prove in sito eseguite.

BIBLIOGRAFIA

- Brinkgreve R.B.J., Boere W., 2004. *Plaxis 2D Version 8 User Manual*. Plaxis b.v., Delft 2004
- Dei Svaldi A., Favaretti M., Pasquetto A., Vinco G., 2005. *Analytical modelling of the soil improvement by injections of high expansion pressure resin*. Atti 6th International Conference on Ground Improvement Techniques, Coimbra 2005, pp. 577-584
- Favaretti M., Germanino G., Pasquetto A., Vinco G., 2004. *Interventi di consolidamento dei terreni di fondazione di una torre campanaria con iniezioni di resina ad alta pressione d'espansione*. Atti XXII Convegno Nazionale di Geotecnica, Palermo 2004, pp. 357-364
- Maiorano R.M.S., Aversa S., 2004. *Modellazione numerica degli effetti prodotti da iniezioni espandenti al di sotto delle fondazioni di edifici in muratura*. Atti XXII Convegno Nazionale di Geotecnica, Palermo 2004, pp. 389-393
- Schweiger H. F., Kummerer C., Otterbein R., Falk E., 2004. *Numerical modelling of settlement compensation*

by means of fracture grouting. Soils and foundations, 44 (1), 71-86

Yu H.S., Houlsby G.T., 1991. *Finite cavity expansion in dilatant soils: loading analysis*. Geotechnique, 41 (2) , 173-183

Amar S et. Al., 1991. *Utilisation des résultats des essais pressiométriques pour le dimensionnement des fondations en Europe, 1ère partie: Pressiomètre Ménard/Pressiomètre Autoforeur*. Rapport du Comité Technique Régional Européen n° 4 Pressiomètres, comitat Français de la Mécanique des Soles et des Fondations (eds), Rotterdam: Balkema, 1991, 37p, ISBN 9054101164

Dano C, 2001. *Comportement mécanique des soles injectées*. Tesi di dottorato di ricerca, Ecole Centrale de Nantes, Université de Nantes.

ABSTRACT

NUMERICAL MODELLING OF A FOUNDATION SOIL IMPROVEMENT UNDERNEATH AN HISTORICAL BUILDING LOCATED IN RUE JOSEPH DE MAISTRE ON THE MONTMARTRE HILL IN PARIS BY INJECTIONS OF HIGH EXPANSION PRESSURE POLYURETANIC RESIN

Keywords: resins, numerical modelling, settlements, calculation software, finite elements.

The numerical modelling of polyuretanic resins injections, providing high-pressure expansion, is presented in this paper by back analysing a soil improvement intervention performed in Paris. Expanding resins are used more and more in ground injections. Designing methods for predicting the ground improvement degree produced by this specific technology can be developed by theoretical approaches. In this case a localized settlement process caused by a leak in a water pipe, was stopped. The injections were performed underneath 7,0 m of strip foundations inside the upper 4,5 m thick soil layer. The soil improvement took place over 4 working days. Starting from specific geotechnical parameters, obtained from the on site tests campaign carried out before and after the injections, settlements as well as stress state and strain state of the soil were modelled. Due to the need of using empirical correlations to get the geotechnical parameters from the pressiometric and penetrometric tests, a statistical approach was followed. The combined use of a dedicated software, based on the finite cavity expansion in dilatant soil theory (Yu H.S. and Houlsby G.T., 1991), and of a finite elements code brought to interesting results. A comparison between theoretical data and on site tests results is also provided. By simulating the injections, meant as a simple soil stiffness increase before and by a stiffness increase together with a volumetric expansion afterwards, the different rise of the bearing capacity has been studied. The consistent Safety Factor improvements experienced during the 2 different simulations showed differences up to 38% due to the different approaches.