

ADEGUAMENTO DELLA CAPACITÀ PORTANTE DEL TERRENO DI FONDAZIONE DI “PALATIUM VETUS” AD ALESSANDRIA CON INIEZIONI DI RESINA ESPANDENTE

Paschetto A., Gabassi M. e Vinco G.
Uretek S.r.l.

Massone G.
Studio Tecnico Massone Giuseppe e Di Cosmo Rita

SOMMARIO

Il progetto di restauro conservativo dell'edificio denominato "Palatium Vetus", sito in Alessandria, ha previsto per gli interventi strutturali ed impiantistici, un significativo aumento dei carichi sulle fondazioni esistenti. Per l'adeguamento preventivo della capacità portante del sedime d'imposta al nuovo stato tensionale, in variante rispetto al progetto originale che prevedeva una sottofondazione con micropali disposti a cavalletto, è stata scelta la tecnica di miglioramento del terreno di fondazione con iniezioni di resina ad alta pressione di rigonfiamento Uretek Deep Injections®. Gli elementi che hanno fatto propendere i progettisti per la scelta di questa tecnologia sono stati: la bassa invasività del metodo e la brevità della durata del cantiere. Le perforazioni di diametro pari a 26 mm, eseguite manualmente, hanno garantito un bassissimo impatto sull'edificio durante i 25 giorni di cantiere necessari per il trattamento del sedime d'imposta di 214 m di fondazioni nastriformi e 17 fondazioni isolate. L'aumento della capacità portante, misurata in cantiere con prove penetrometriche comparative, ha superato ampiamente gli obiettivi progettuali.

Parole chiave: consolidamento, resine, iniezioni, Uretek, restauro

1 INQUADRAMENTO STORICO

"Palatium Vetus" è il più antico complesso immobiliare di Alessandria ed è stato edificato nel 1170 nel cuore della città.



Figura 1. La struttura è costituita da un corpo unico su due livelli fuori terra, con cortile centrale.

L'edificio rappresentava il centro della vita politica, amministrativa e giudiziaria del comune medioevale.

Nel 1856, dopo vari passaggi, il palazzo venne ceduto dal Comune allo Stato e negli anni seguenti quasi tutti i locali affacciati a via dei Martiri furono venduti a privati, mentre nel fabbricato prospettante piazza della Libertà fu sistemato il corpo di guardia del Comando di Divisione.

Già all'inizio del Settecento sul lato di via Migliara si aprivano vari negozi riconfermando la più che secolare destinazione commerciale della via.

Fino al 1995 il complesso edilizio ha ospitato il Presidio e il Distretto Militare e ora attende una nuova destinazione.

2 PROGETTO DI RESTAURO CONSERVATIVO

Nei secoli, il palazzo è stato al centro di diversi interventi di ristrutturazione ed ampliamento, solo in parte documentati, che hanno modificato la configurazione della struttura e di conseguenza la storia tensionale del terreno sottostante.

Oggi la struttura si presenta costituita da un corpo unico su due livelli fuori terra con varie tipologie di fondazione.

Il progetto di ristrutturazione, oggetto di questa memoria, ha previsto l'adeguamento delle caratteristiche del terreno alla configurazione di carico successiva agli interventi di restauro conservativo sull'immobile.

2.1 Analisi dei carichi

Dalla relazione tecnica di progetto, si evince che l'incremento dei carichi dovuto al restauro, si è attestato tra il 9% ed il 50% (medio 18-20%) del carico stimato nella configurazione ante intervento.

La pressione finale al suolo (carichi permanenti ed accidentali), è funzione della tipologia di fondazione e dell'allineamento considerato ed è variabile tra 0,35 e 1,19 MPa.

2.2 Geometria delle fondazioni

Per determinare la quota del piano d'imposta e la larghezza delle fondazioni, sono state eseguite delle perforazioni in diversi punti dell'edificio.

I fori sono stati realizzati impiegando un perforatore manuale elettrico a rotopercolazione, avente energia massima di battuta di circa 12-14 Joule e frequenza di 1200-2800 colpi/minuto.

Le aste di perforazione giuntabili ad elica continua, di lunghezza pari a 920/1400/1800/2400 mm e diametro massimo di 26 mm, sono state impiegate in accoppiamento a prolunghie della lunghezza di 800 mm collegate mediante manicotto.

Le perforazioni sono state realizzate sia a ridosso della muratura, per determinare la profondità del piano d'imposta della fondazione, che a distanza crescente dalla stessa, allo scopo di indagare l'eventuale presenza di allargamenti o travi di collegamento fra i plinti.



Figura 2. Indagine sulle fondazioni.

In totale si sono realizzate perforazioni continue a distruzione in 14 aree distinte della struttura, distribuite omogeneamente su tutta l'impronta dell'edificio; è stato così possibile appurare che le murature oggetto d'indagine sono realizzate in mattone pieno e legante. In taluni casi, alla base della fondazione, si è rilevata la presenza di materiale lapideo di elevata consistenza di spessore variabile e non inferiore a 10/15 cm.

La profondità della fondazione, individuata durante la fase di perforazione, varia da un minimo di 0,5 m ad un massimo di 3,2 m; non sono emerse discontinuità dei paramenti murari indagati.

Per il controllo dello stato tensionale e delle caratteristiche di deformabilità delle murature sono state realizzate delle prove con martinetti piatti.

3 CONDIZIONI GEOTECNICHE

Le modeste caratteristiche di resistenza dei terreni sino a 7,00 m di profondità hanno imposto, oltre ad un'accurata stima dello stato tensionale al di sotto delle fondazioni esistenti, anche un'indagine geognostica mirata a valutare le condizioni di sicurezza dell'immobile.

Dagli elementi raccolti, è emersa la necessità di un intervento di consolidamento preventivo del terreno di fondazione, mirato ad adeguare le caratteristiche del sedime d'imposta allo stato tensionale di progetto.

3.1 Indagini geognostiche

Per accertare la natura ed i parametri di resistenza dei terreni in situ sono state eseguite due prove penetrometriche dinamiche ed un sondaggio geognostico completo di prove SPT e prelievo di campioni per prove di laboratorio.

Da questi campioni si sono poi ricavate la curva granulometrica e la massa volumica apparente e si sono realizzate prove edometriche, di taglio diretto e triassiali (CIU).

3.2 Inquadramento geologico generale

L'area in esame appartiene alla piana fluviale alessandrina caratterizzata dalla presenza in superficie di ampie conoidi alluvionali; questi depositi, prevalentemente grossolani, si interdigitano lungo il bordo del Monferrato con i materiali più fini del fiume Tanaro.

L'esecuzione del sondaggio e delle due prove penetrometriche ha confermato la successione stratigrafica presente in gran parte del concentrico di Alessandria.

Al di sotto di una coltre di riporto, è stata rilevata una copertura argillosa debolmente limosa che sfuma, intorno ai 5,00 m, in terreni non coesivi. Gli stessi sono costituiti da un orizzonte di limi sabbiosi passanti a sabbia limosa da sciolti a mediamente addensati avente potenza di circa 1,00 m, che posano su una bancata ghiaiosa posta ad una profondità di 6,30 – 7,80 m. Approfondendosi sotto a tale orizzonte, si riscontra un'alternanza di livelli di ghiaie e ciottoli in matrice sabbiosa, da fine a grossolana, sino ad almeno 25,00 m di profondità, massima quota di indagine.

3.3 Inquadramento idrogeologico

Da uno studio idrogeologico della pianura alessandrina, si può osservare come nel concentrico di Alessandria la profondità media della falda superficiale si attesti intorno a 10,00 m.

Durante il sondaggio geognostico si è riscontrata la falda a -9,50 m, dato che ben si accorda con quelli bibliografici citati.

3.4 Parametri geotecnici

È stata tracciata una sezione geotecnica interpretativa in cui vengono individuati gli orizzonti di terreno aventi

litologia e comportamento geotecnico simile. Si riporta qui di seguito la tabella riassuntiva dei parametri geotecnici maggiormente significativi:

Tabella 1. Parametri geotecnici.

Profondità da piano cortile [m]	Individuazione livello geotecnico	Angolo d'attrito interno ϕ [°]	Resistenza al taglio non drenata c_u [Kg/cm ²]	Peso di volume naturale γ [t/m ³]
0.00 ÷ (1.50-2.40)	Riporto	n.c.	n.c.	n.c.
(1.50-2.40) ÷ 4.50	Argilla debolmente limosa	-	0,20-0,25	1,80
4.50 ÷ 5.40	Limi sabbiosi	25-26		1,80
5.40 ÷ (6.00-6.30)	Ghiaie in matrice sabbioso-argillosa	29-31		1,90
(6.00-6.30) ÷ (10.20-10.50) Falda -9,60 m	Ghiaie e ciottoli in sabbia grossolana	34-36		2,00
(10.20-10.50) ÷ (13.50-14.10)	Ghiaie e ciottoli in matrice limo sabbiosa fine	32-33		2,00
>(13.50-14.10)	Ghiaie e ciottoli in sabbia grossolana	34-36		2,00

4 INTERVENTO DI CONSOLIDAMENTO DEL TERRENO

Gli interventi eseguiti, miravano ad incrementare la capacità portante del terreno di fondazione, per adeguarla allo stato tensionale di progetto; l'aumento della pressione al suolo è dovuta all'aumento dei carichi previsto per i lavori di ristrutturazione.

Dato il valore storico dell'edificio, si è ritenuto importante non interferire direttamente con le strutture murarie esistenti.

L'intervento ha interessato il volume di terreno compreso tra il piano d'imposta della fondazione e la profondità di 3,50 m a partire da quest'ultimo.

Si è scelto d'intervenire esclusivamente con il metodo di consolidamento Uretex Deep Injections®.

Nel sedime d'imposta è stata iniettata una resina poliuretana capace d'esercitare, nel corso della sua espansione, un'elevata pressione di rigonfiamento che compatta il terreno in profondità. Questo materiale bicomponente ha tempi di polimerizzazione estremamente rapidi; in questo modo, la miscela iniettata resta confinata all'interno del bulbo di terreno maggiormente interessato dalle tensioni indotte dai carichi in superficie.

4.1 Progettazione

In base ai dati acquisiti e grazie all'utilizzo del software URETEK S.I.M.S. 1.0, è stato realizzato un modello con il quale si è studiata l'interazione terreno-struttura ed è stato calcolato il quantitativo esatto di resina Uretex Geoplus® necessario al raggiungimento della capacità portante di

progetto.

Lo stato tensionale iniziale, trasmesso dalla struttura al terreno, è stato schematizzato sulla base della teoria di Boussinesq; quello finale, conseguente all'espansione della resina, è invece stato calcolato utilizzando il software sopraccitato.

Il programma implementa la teoria dell'espansione di una cavità sferica o cilindrica (Yu H.S. e Houlsby G.T., 1991) accoppiata alla relazione sperimentale che descrive la pressione di rigonfiamento della resina in funzione del suo peso di volume (Dei Svaldi A., 2005).

Partendo dai parametri geotecnici del terreno indisturbato è possibile calcolare il miglioramento atteso, in termini d'incremento di resistenza penetrometrica alla punta (q_c), in funzione della quantità di resina iniettata.

La variabile dell'analisi è il raggio d'influenza della singola iniezione (funzione della quantità di resina iniettata), scelto in modo tale da permettere la compenetrazione dei volumi di terreno sensibili all'effetto consolidante indotto dall'espansione della resina.

Il software calcola l'aumento della pressione di confinamento offerta dal terreno durante il processo d'espansione e lo confronta con la diminuzione della pressione di rigonfiamento generata dalla resina durante la reazione chimica di polimerizzazione. Ciò avviene in ragione del fatto che lo stato di tensione del terreno ospitante determina la pressione d'espansione alla quale la resina completa la reazione di polimerizzazione.

Il punto di equilibrio tra queste due grandezze identifica, sul grafico della curva della pressione di rigonfiamento caratteristica del materiale iniettato, il peso di volume della miscela espansa.

Pertanto: il volume espanso di resina iniettata è calcolabile, partendo dal volume di materiale liquido, utilizzando la relazione sperimentale che descrive la pressione di rigonfiamento del materiale in funzione del suo peso di volume e la teoria dell'espansione di una cavità sferica o cilindrica.

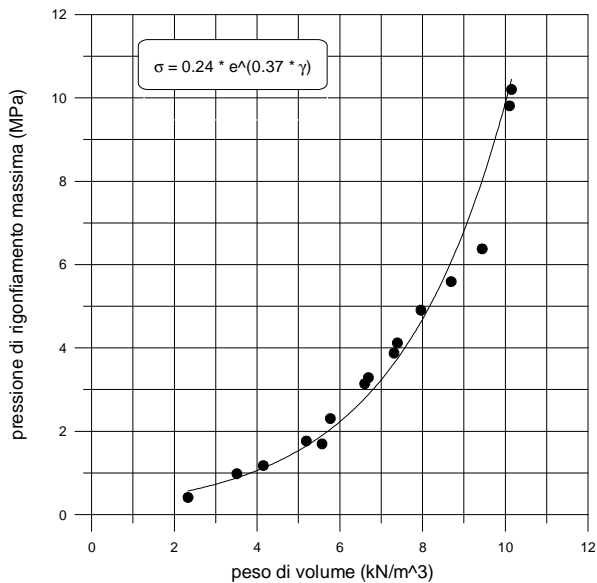


Figura 3. Pressione di rigonfiamento della resina Uretek Geoplus® in funzione del peso di volume.

4.2 Iniezioni di consolidamento

Alla fase di progettazione è seguita quella operativa di cantiere durante la quale sono state realizzate le iniezioni che, al fine di interessare tutto il volume da trattare, sono state eseguite posizionando i tubi alternati su differenti piani di profondità.

L'intervento ha previsto la suddivisione dell'area in 4 zone che sono state trattate sequenzialmente, in maniera tale da ottimizzare al meglio i tempi di intervento ed il coordinamento con le maestranze operanti in cantiere.

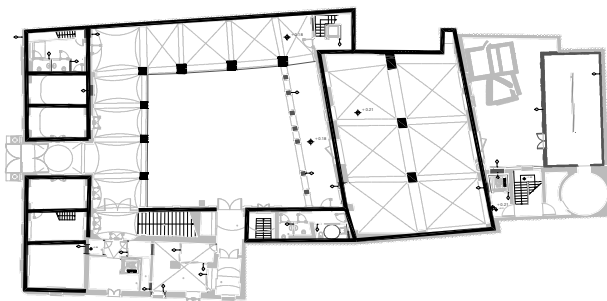


Figura 4. Planimetria dell'intervento.

L'esecuzione dei fori d'iniezione ($\phi=26\text{mm}$, interasse $0,60\text{ m}$) è stata realizzata con perforatori manuali identici

a quelli utilizzati per i saggi in fondazione e con modalità analoghe, perforando direttamente attraverso il corpo murario per una lunghezza massima pari a $4,00\text{ m}$ oltre il piano d'imposta.

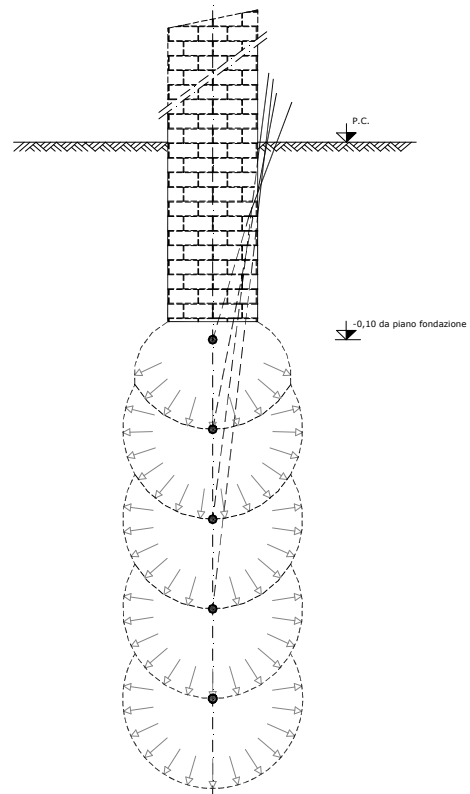


Figura 5. Sezione tipo livelli d'iniezione.

Seguendo questa procedura è stato possibile trattare il terreno con estrema precisione, localizzando l'effetto delle iniezioni molto accuratamente e producendo delle vibrazioni assolutamente trascurabili.

La bassa invasività della tecnologia è un aspetto fondamentale per interventi su edifici storici di alto pregio architettonico.

La scelta della posizione e dell'interasse dei punti d'iniezione è determinante per il buon esito dell'intervento e, qualora si tratti il terreno di fondazione di elementi strutturali molto rigidi, è giustificata una distribuzione delle iniezioni che tenga in considerazione la capacità di ripartizione dei carichi degli stessi. In termini di consumo di materiale, risulterà economicamente vantaggioso localizzare le iniezioni nel volume di terreno maggiormente interessato dalle tensioni indotte dai carichi soprastanti (Stilley A. N., 1982).

In base alla teoria di Boussinesq, per fondazioni isolate, ad una profondità pari a due volte la larghezza delle fondazioni, le tensioni sono pari a circa il 15% di quelle agenti in superficie. Tenendo conto di ciò e dell'analisi della geologia specifica, si è optato per un intervento esteso fino alla profondità di ca. $3,50\text{ m}$ (a partire dal piano d'appoggio della fondazione) con iniezioni eseguite su 5 livelli di profondità omogeneamente distribuiti.



Figura 6. Tubi d'iniezione e sistema di monitoraggio.

4.3 Monitoraggio

Il metodo Uretex Deep Injections[®], prevede il monitoraggio costante ed in tempo reale della struttura durante le operazioni d'iniezione della resina. Si utilizza, a tal fine, una strumentazione laser di precisione che permette di rilevare gli spostamenti verticali della struttura che vengono segnalati su un display digitale.

Questa operazione ha il duplice scopo di scongiurare eccessivi sollevamenti e di verificare l'efficacia del trattamento.

4.4 Collaudo

Il miglioramento delle caratteristiche di resistenza dei terreni di fondazione a seguito dell'iniezione di resine espandenti può essere verificato direttamente con due metodologie:

- prelievo di campioni e prove di laboratorio
- esecuzione di prove geotecniche in situ

Il confronto dei valori *ante* e *post* intervento permette di determinare quantitativamente l'entità del miglioramento dei valori di resistenza in seguito alle iniezioni di resina.

L'ottenimento di campioni di terreno indisturbati, rappresentativi del terreno trattato, risulta spesso assai complicato. Per questo motivo, nel caso in esame, si è preferito realizzare prove penetrometriche prima e dopo l'intervento.

Pur essendo un metodo di verifica che ricava i parametri di resistenza dei terreni in modo indiretto, queste prove presentano il grande vantaggio di essere estremamente speditive e di non far subire rimaneggiamenti ai terreni.

Al termine della fase delle iniezioni, per collaudare l'intervento di consolidamento, si è fatto così riferimento ai risultati di 14 prove penetrometriche comparative, eseguite prima e dopo le iniezioni, distribuite in ognuna delle 4 zone trattate.



Figura 7. Penetrometro DPM 30.

I test sono stati realizzati con penetrometro DPM 30, uno strumento estremamente maneggevole, che consente di eseguire le prove in zone poco accessibili e lungo verticali prossime alla mezzeria della fondazione.

A parere degli scriventi, questo tipo di indagini risultano spesso inaffidabili per la determinazione dei parametri del terreno. Tuttavia, se usati in modo comparativo ante e post trattamento, questi test rappresentano un valido metodo di verifica del miglioramento indotto dalle iniezioni, che è misurato in termini di incremento di resistenza penetrometrica.

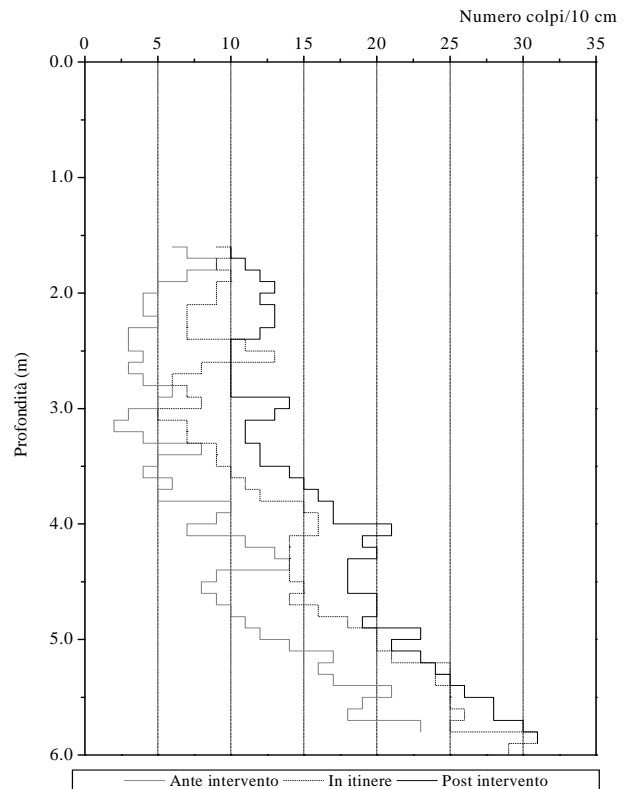


Figura 8. Confronto fra prove penetrometriche eseguite prima e dopo il consolidamento.

I valori misurati hanno evidenziato che l'obiettivo prefissato, ovvero un incremento della resistenza penetrometrica del 40%, è stato raggiunto e superato in tutti i punti indagati, con picchi che in alcuni punti hanno raggiunto miglioramenti superiori al 100%.

Grazie alla versatilità della tecnologia così come del metodo di verifica, è stato possibile eseguire dei test in itinere che hanno evidenziato alcune aree particolarmente problematiche. In questi tratti di fondazione, dopo la prima fase d'iniezioni durante la quale sono stati iniettati i quantitativi di resina fissati da progetto, si è reso necessario un trattamento integrativo. Le iniezioni aggiuntive sono state realizzate a metà dell'interasse di quelle della fase precedente ed hanno permesso di raggiungere l'obiettivo e completare l'intervento.

Lo schema progetto-monitoraggio-collaudo, seguito durante le fasi di questo delicato intervento, è stato concepito in ottemperanza alle prescrizioni del D.M. 14.01.2008 in ambito di progettazione geotecnica, che impongono che "il monitoraggio degli interventi debba essere previsto in progetto e descritto in dettaglio" e che "gli esiti delle misure e dei controlli costituiscano elemento di collaudo dei singoli interventi".

4 CONCLUSIONI

Questo interessante intervento di consolidamento preventivo del terreno di fondazione di un edificio storico, ha permesso di mettere in luce alcuni vantaggi peculiari della tecnologia Uretrek Deep Injections®.

La bassa invasività e la versatilità della tecnologia, hanno consentito di realizzare i lavori in spazi ristretti senza ricorrere a scavi od altre lavorazioni complementari ed in tempi molto rapidi.

Le indagini preliminari all'intervento, hanno evidenziato l'importanza di una campagna geognostica completa che comprendesse, oltre alla determinazione dei parametri geotecnici del terreno, anche il rilevamento della geometria delle fondazioni realizzato direttamente dalla società appaltatrice.

I parametri ottenuti dalle indagini hanno consentito di realizzare la progettazione esecutiva con un software dedicato, ottemperando alle prescrizioni della nuova normativa.

BIBLIOGRAFIA

Dei Svaldi A., Favaretti M., Paschetto 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

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

Stilley A. N., 1982. "Compaction grouting for Foundation Stabilization". ASCE Proceedings of the Conference on Grouting in Geotechnical Engineering, New Orleans, LA, pp. 923-937

ABSTRACT

IMPROVEMENT IN BEARING CAPACITY OF THE FOUNDATION GROUND OF "PALATIUM VETUS" IN ALESSANDRIA USING EXPANDING RESIN INJECTIONS

Keywords: ground improvement, resins, injections, Uretrek, renovation

In this paper an interesting case history, of a preventive bearing capacity improvement intervention, is described.

Due to a deep restoring of the ancient "Palatium Vetus" in Alessandria, which led to a significant load increase, its foundation ground parameters needed to be improved. In order to avoid invasive works and strong vibrations on the building, the Uretrek Deep Injections® technology has been chosen.

This peculiar technique compacts the ground, directly underneath the foundation with polyuretanic resin injections performed at several depth levels using small diameter pipes.

The two components material, due to a chemical reaction, increases its volume and develops in the meanwhile a high expansion pressure, which compacts the soil volume mostly influenced by the stress state induced by the overlaying building.

The intervention has been designed using a dedicated software based on the cavity expansion theory.

The designing parameters were obtained with a geotechnical investigation that included in field and laboratory tests, as well as several test drillings through the foundation to determine its geometry.

To fulfill the new NTC 2008 code prescriptions a monitoring system has been installed and several penetrometric tests have been performed before and after the injections to verify the results.

After the first injection phase the tests evidenced the need of additional injections in some problematic areas, which have been performed in the middle of the former drillings.

At the end of the job-site the initial goal of 40% penetrometric resistance increase has been achieved in every investigated point and the intervention has been concluded successfully.