

Millora dels fonaments: una anàlisi en profunditat de la tècnica d'injecció de resines

Foundation improvement: an in-depth analysis of the resin injection technique

Terricabras-Bigas, Ivet

Escola Politècnica Superior – Universitat de Girona, Catalunya, Espanya
t.ivet9100@gmail.com

Abstract

The foundation is an essential element in the structure of a building that, over time, may suffer damage due to changes in the building or in the supporting soil. Fortunately, much research has been conducted on the subject, and there are many techniques for improving the foundation, including ground improvement techniques. Unlike traditional support methods, ground improvement techniques, especially injections, do not interfere with the structure of the building, making their impact less significant. In recent years, the use of expandable resin injection has become a popular option due to its effectiveness and quick execution. This technique involves the application of resin into the soil, which expands and consolidates the adjacent soil, thereby strengthening the building's foundation. The aim of this article is to provide a theoretical understanding of how expandable resin injection works and how is its on-site implementation to achieve an effective improvement of the foundation.

Keywords: Foundation, Consolidation, Soil improvement, Injection, Expandable resin.

Resum

La fonamentació és un element essencial en l'estructura d'un edifici que, amb el temps, pot patir desperfectes a causa de canvis en l'edifici o en el terreny que el suporta. Afortunadament, s'ha investigat molt en el tema i existeixen moltes tècniques de millora de la fonamentació, entre les quals hi ha les tècniques de millora del terreny. A diferència dels mètodes de suport tradicionals, les tècniques de millora del terreny, especialment les injeccions, no intervenen en l'estructura de l'edifici, per la qual cosa tenen un impacte menor sobre el mateix. En els darrers anys, la injecció de resina expansiva s'ha convertit en una opció popular a causa de la seva eficàcia i la seva rapidesa d'execució. Aquesta tècnica consisteix en l'aplicació de resina en el terreny que s'expandeix consolidant el sòl adjacent, reforçant així la base de l'edifici. Aquest article té com a objectiu entendre teòricament com funciona la injecció de resina expansiva i com és la seva implantació en obra per aconseguir una millora efectiva de la fonamentació.

Paraules clau: Fonamentació, Consolidació, Millora del terreny, Injecció, Resina expansiva.

Introducció

El verb recalçar, segons el Diccionari de la Llengua Catalana de l'Institut d'Estudis Catalans, té dos significats. En l'àmbit de l'agricultura recalçar significa "Arrambar terra al volt del peu d'un arbre, d'una planta, cobrint-lo" i en construcció "Consolidar, reforçar, reconstruir, els fonaments d'una casa, d'un mur, etc., eventualment per sota de la fonamentació existent, sense perjudicar-ne l'estructura". Aquestes definicions, tot i ser d'àmbits diferents, expressen una mateixa idea, proporcionar un suport major a l'existent.

En construcció, les fonamentacions tenen un paper molt important per tal de garantir l'estabilitat de l'edifici i la seva durabilitat. Tanmateix, amb el temps es poden veure afectades per canvis en l'edifici, com per exemple, un augment de sobrecàrregues a causa d'un canvi d'ús o modificacions en l'estructura, o en el seu entorn, com un defecte o alteració del subsol o la construcció d'un edifici nou adjacent, que posen en risc la integritat de l'edifici fent que sigui necessari millorar les fonamentacions.

La intervenció requereix un estudi previ detallat de l'edifici i les causes que la motiven per tal de consolidar les fonamentacions amb el mètode que més s'adeqüi a les circumstàncies. En qualsevol cas, els principis bàsics perquè la intervenció tingui èxit són: mínima interferència amb la construcció existent i transferència de càrregues a la fonamentació millorada de manera adequada. (Jiménez Salas 1980)

S'utilitzen diverses tècniques que es podrien diferenciar en dos grans grups, les tècniques que actuen sobre l'estructura i les que actuen sobre el terreny. Tradicionalment les tècniques més emprades han estat els recalços de la fonamentació, tant de manera superficial com profunda. Les tècniques que modifiquen les capacitats geotècniques del terreny s'han utilitzat de manera complementària per poder treballar amb més seguretat durant l'obra.

En l'actualitat, s'han anat perfeccionant aquestes tècniques per tal que puguin funcionar de manera permanent i sense haver d'intervenir en la fonamentació existent. Aquestes tècniques són les injeccions de ciment o altres productes químics com els gels de sílice i les resines. Un bon disseny d'una injecció té en compte diversos paràmetres com la viscositat del material d'injecció, la pressió aplicada, el radi efectiu i el temps d'injecció. Aquests paràmetres aniran condicionats també per la tipologia de sòl en el qual s'ha d'injectar.

La tipologia d'injeccions que s'estudia en més profunditat en el treball és la injecció de resina expansiva. És un sistema que no intervé en l'estructura de l'edifici existent i millora les característiques del sòl de la fonamentació. És important que durant tot el disseny i l'execució de l'obra hi hagi un control exhaustiu de tot el procés, mitjançant diverses tècniques, per tal de garantir l'èxit de la intervenció.

L'estudi de diversos casos reals permet entendre quan és oportú utilitzar aquest mètode i no un altre i valorar l'èxit de la tècnica en cada cas. És una eina per verificar si les injeccions de resina expansiva han de ser valorades o no a l'hora d'actuar en la fonamentació en edificació existent envers a altres mètodes més tradicionals.

1. Metodologia

La metodologia d'aquest treball d'investigació sobre la millora de la fonamentació a través de la tècnica de la injecció de resina consistirà en la recerca i revisió bibliogràfica d'articles, llibres, normatives i altres fonts de referència especialitzades en el tema, així com en l'estudi de casos pràctics per poder tenir una major comprensió de la tècnica.

L'anàlisi de la informació obtinguda s'ha dut a terme amb l'objectiu de comprendre la tècnica de millora de la fonamentació amb injeccions de resines, el seu funcionament i la seva aplicació. L'anàlisi s'ha fet de manera qualitativa estudiant les bases teòriques, els processos constructius i les tècniques associades al control d'execució. També hi ha una part d'anàlisi quantitativa que es fa a través de l'estudi i la comparació de dades obtingudes en casos pràctics per les diferents distribuïdores del producte.

Es preveu que aquesta metodologia permeti comprendre a fons la tècnica objecte d'estudi i els efectes d'aquesta sobre el terreny, així com tenir una anàlisi comparada de les diferents tècniques de millora del terreny per tal de veure les diferències i similituds. També s'espera comprendre l'execució de la tècnica gràcies a la descripció detallada dels diferents processos. Finalment, a partir d'aquesta informació, es podrà concloure sobre la tècnica i la seva eficàcia per solucionar problemes derivats de les fonamentacions.

2. Antecedents

Tradicionalment, la millora dels fonaments es realitzava excavant un pou fins a la fondària necessària i omplint-lo de formigó, fent que el contacte entre el fonament existent i el formigó fos el més íntim possible. (Mañá i Reixach 1995). Tanmateix, és un sistema difícil d'aplicar en la majoria dels casos, ja que no sempre es disposa de l'espai suficient per actuar o l'estrat bo es troba a una fondària que no és accessible a través de pous.

Actualment, les tècniques emprades per al reforç dels fonaments són més diverses i es podrien classificar segons si es tracta d'una intervenció en la mateixa estructura o d'una tècnica basada en la millora del sòl.

Tècniques d'intervenció en el fonament

Igual que quan parlem de fonamentacions, a l'hora d'intervenir en aquestes, distingim principalment dues tipologies: les superficials i les profundes. Com ja s'ha mencionat anteriorment els recalços pretenen resoldre defectes de la fonamentació deguts, o bé, a una mala execució o inadequada projecció, o bé, a variacions en l'estructura o en l'estat de deformació del terreny. L'execució d'un recalç de fonamentació pot estar comprès per les fases següents (Jiménez Salas 1980):

1. Estructura provisional, si és necessari.
2. Transferència de càrregues de la fonamentació existent a l'estructura provisional.
3. Construcció del recalç o la nova fonamentació.
4. Transferència de càrregues a la fonamentació intervinguda.

L'estructura provisional ha de mantenir els requisits de l'edifici respecte a l'estabilitat, la resistència i la deformació admissible, sense que entorpeixi l'actuació i el moviment dins de l'obra. Les solucions tradicionals que s'utilitzen per a l'estructura provisional són l'apuntament, fins a terra o entre murs, i l'estintolament. (Llorens Duran 1998)

Tècniques superficials

Les tècniques superficials de millora dels fonaments es basen en la millora de les condicions de fonamentacions superficials a nivells de profunditat pròxims a aquestes. L'objectiu de la millora de la fonamentació determina la tipologia de recalç.

Quan les condicions de suport del fonament són apropiades, però l'estat de conservació d'aquest és deficient, es pot fer una reparació per tal de restituir l'estat original del fonament. S'utilitzen diversos procediments, com per exemple, la injecció de beurada o morter en el fonament, la introducció d'armadura de reforç o l'encercolat (Fig. 1). (Llorens Duran 1998)

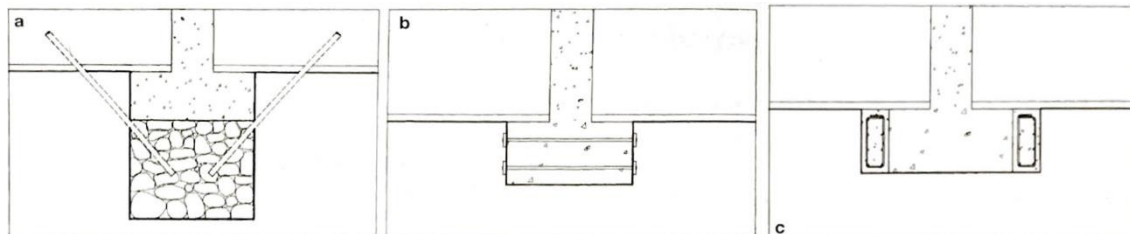


Fig. 1 Reparacions: a) Injecció; b) Armat; c) Encercolat. Font: Llorens Duran, J.I (1998)

Quan el problema és la superfície de suport, i el fonament es troba en bon estat, es procedeix a fer una ampliació per tal de disminuir la pressió de contacte o mantenir-la, en el cas que hi hagi un augment de les càrregues. L'ampliació del fonament es pot fer de dues maneres, en planta o en profunditat (Fig. 2).

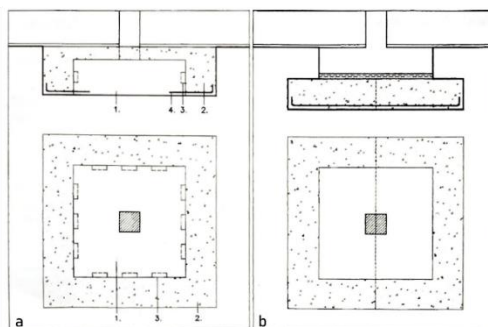


Fig. 2 Ampliació: a) en planta; b) en profunditat. Font: Llorens Duran, J.I (1998)

L'ampliació en planta consisteix a augmentar la base del fonament actuant en el seu contorn mantenint el mateix pla de suport. Per tal que la forma de treballar de la sabata no es vegi alterada és important garantir l'adherència entre el formigó existent i el nou. Això s'aconsegueix a través de queixals en el formigó existent o col·locant barres d'unió entre ambdós laterals. Aquestes barres d'unió poden entrar només en el queixal o poden travessar completament la fonamentació existent. En aquest últim cas, hi ha la possibilitat de tesar-les, per tal d'assolir una millor adherència (Fig. 3). (Monjo Carró, Maldonado Ramos 2001)

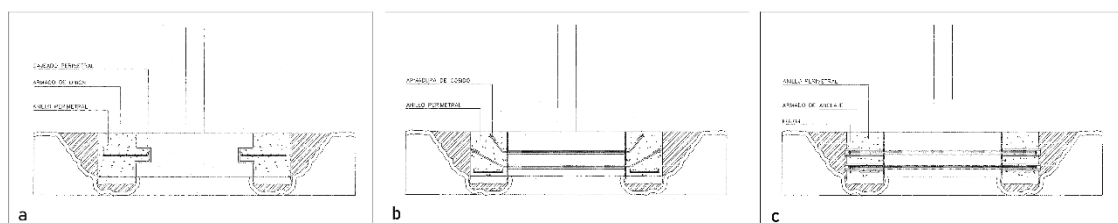


Fig. 3 Sistemes de connexió entre el formigó existent i el nou: a) queixal amb barres d'unió; b) barres de cosit travessant el fonament existent; c) barres d'ancoratge tesades. Font: Monjo Carró, J; Maldonado Ramos, L (2001)

Una altra manera d'ampliar la superfície de contacte amb el terreny és la realització de lloses de fonamentació en els espais existents entre les sabates.

L'ampliació en profunditat consisteix en la construcció d'una nova sabata per sota de l'existent i que tingui les dimensions suficients per poder suportar les càrregues. És un sistema molt eficaç, ja que garanteix la correcta transmissió de càrrega i disminueix la pressió sobre el terreny, però és un sistema complex d'executar, pel fet que és necessari descalçar el fonament existent i estintolar l'estructura per tal de descarregar-la. En sabates contínues el descalç s'ha de dur a terme per dames, d'aquesta manera el mur funciona com a arc de descàrrega i és prescindible l'estintolament (Fig. 2). (Monjo Carró, Maldonado Ramos 2001)

Finalment, quan la reparació o l'ampliació no són possibles, caldrà substituir el fonament. Es pot substituir totalment, sistema que requereix una execució complexa, o es pot substituir funcionalment, realitzant una fonamentació nova al perímetre de l'existent i transmetent les càrregues a través de bigues d'acer o de formigó. (Monjo Carró, Maldonado Ramos 2001)

Tècniques profundes

Les tècniques profundes de millora dels fonaments, no són solament per a la fonamentació profunda, sinó que també s'utilitzen per recalçar la superficial quan és necessari buscar un terreny ferm a més profunditat, ja sigui perquè les característiques del sòl s'han alterat o perquè es vol construir un soterrani sota un edifici existent. Els sistemes que es fan servir són sistemes de fonamentació profunda, excepte el cas dels pous, que són considerats fonamentació semi profunda, ja que la profunditat a la qual es pot arribar és més limitada.

El pou com a recalç de la fonamentació consisteix a afegir formigó sota la sabata existent fins a arribar a un terreny ferm. Es realitza l'excavació per trams per tal de no descalçar el fonament existent de manera completa (Fig.4). Com s'ha mencionat anteriorment és una tècnica de fonamentació semi profunda, ja que no és aconsellable superar els 12 metres de profunditat ni sobrepassar el nivell freàtic. (Monjo Carró, Maldonado Ramos 2001)

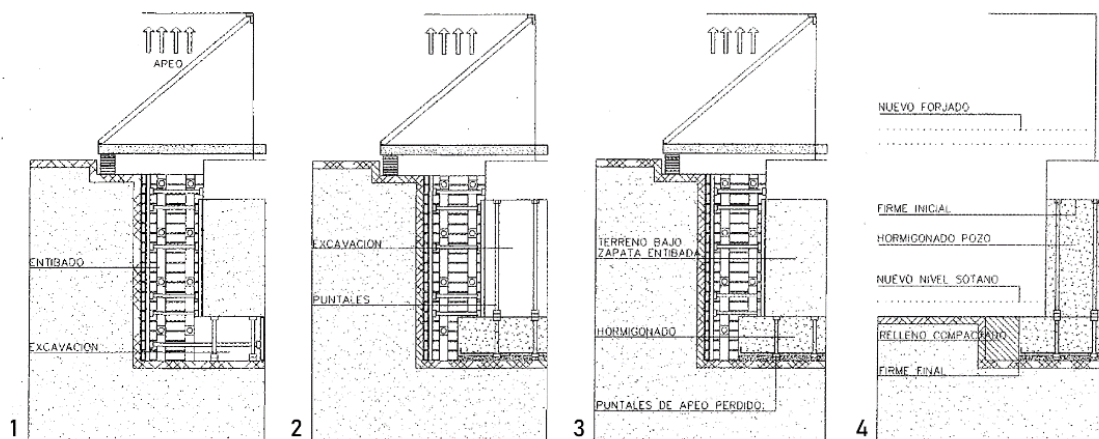


Fig. 4 Procés de reforç d'una sabata mitjançant un pou. Font: Monjo Carró, J; Maldonado Ramos, L (2001)

Els sistemes de fonamentació profunda que permeten arribar a profunditats més elevades i, no en tots els casos, sobrepassar nivells freàtics són els pilons excavats, els pilons clavats i els micropilons.

Els pilons excavats in situ són pilons convencionals d'entre 30 i 60 centímetres de diàmetre que s'excaven al llarg del perímetre de la fonamentació existent mitjançant una hèlix contínua i es connecten entre ells i la fonamentació existent a través de ceps de connexió. Aquests ceps de connexió poden ser continus, discontinus, a través de bigues passants o, en casos en què els pilots no es puguin col·locar a tots els laterals de la fonamentació, amb mènsoles per sota

d'aquestes. És un sistema que requereix una maquinària concreta i sovint no hi ha l'espai suficient. A més, s'ha d'anar amb compte, perquè l'ús d'aquesta maquinària sol provocar vibracions que poden afectar a l'edifici dins del qual s'està treballant. (Monjo Carró, Maldonado Ramos 2001)

El mètode que s'utilitza pel recalç amb pilons clavats no és el mateix mètode que quan aquests són la fonamentació d'una obra nova, no s'executen amb mecanismes de vibració o percussió perquè es podrien provocar danys a l'edifici. El mètode emprat és a través de pressió, mitjançant gats hidràulics que treballen contra la mateixa fonamentació a recalçar. Amb aquest gat hidràulic es van clavant trams del piló metàl·lic o de formigó fins a formar el piló complet. Seguidament, es formigona el tram del gat hidràulic. És un sistema molt útil en terrenys amb un nivell freàtic elevat (Fig.5). (Monjo Carró, Maldonado Ramos 2001)

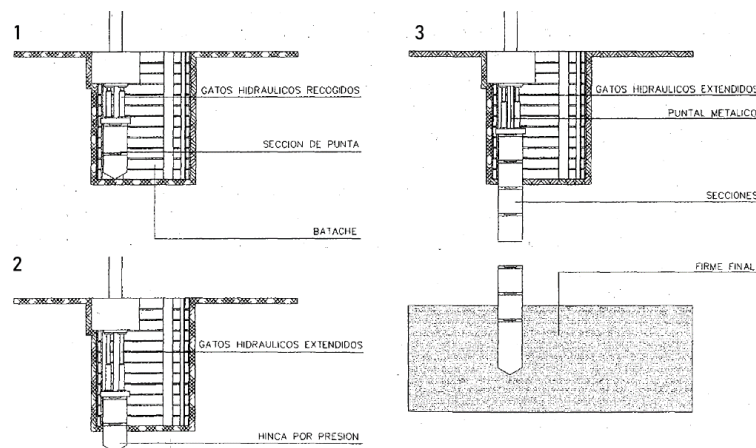


Fig. 5 Procés pilons clavats a pressió. Font: Monjo Carró, J; Maldonado Ramos, L (2001)

A diferència dels pilons, els micropilons tenen un diàmetre inferior a 30 centímetres, sent els més usats els que oscil·len entre 15 i 20 centímetres. Es perforen in situ verticalment o amb inclinacions que s'aproximen als 20 graus. (Cervelló i Delgado 1998). La maquinària que es fa servir per a la perforació és més lleugera i de dimensions inferiors a la maquinària de perforació dels pilots, de manera que és més fàcil poder utilitzar aquest sistema en espais reduïts. Un cop realitzada la perforació, aquesta s'arma i s'omple de formigó o morter.

Gràcies a les seves dimensions reduïdes es perfora travessant la fonamentació existent, fent que aquesta i la fonamentació nova funcionin de manera conjunta. Com que en cap moment es descalça la fonamentació existent, aquesta està en funcionament durant tota l'obra i no és necessària la construcció d'una estructura provisional, fet que fa més àgil el procés d'execució. (Monjo Carró, Maldonado Ramos 2001)

Existeixen diversos sistemes de micropilons per recalçar que es diferencien entre ells per la manera de perforar i formigonar. Segons la perforació pot ser amb camisa o sense i s'escull un sistema o l'altre en funció de l'estabilitat del sòl. Segons el formigonat hi ha el sistema tradicional de formigonat i el sistema amb bulb injectat a pressió.

La perforació sense camisa consisteix en una excavació en sec amb barrina helicoidal. Un cop retirada la terra s'introdueix l'armadura i s'injecta el formigó mitjançant un tub auxiliar des del fons del pilot. Aquest sistema de perforació és útil per sòls no gaire tous i sense presència de nivell freàtic. (Monjo Carró, Maldonado Ramos 2001)

La perforació amb camisa consisteix en una excavació amb bateria de perforació a rotació que a la vegada fa de camisa. Les terres es van extraient gràcies a la pressió de l'aigua que s'utilitza per a la refrigeració de la corona. Hi ha sistemes en els quals la corona queda perduda i funciona com a armat del micropiló, però en d'altres aquesta es retira a mesura que s'injecta el formigó a baixa pressió. (Monjo Carró, Maldonado Ramos 2001)

El sistema de formigonat amb bulb injectat a pressió, és un sistema que es pot usar amb qualsevol sistema de perforació explicat anteriorment. Amb la perforació feta, es col·loca l'armadura del micropiló, que en aquest cas, és un tub d'acer amb maneguets i vàlvules antiretorn a la part inferior. El formigonat es realitza en dues fases: formigonat de l'espai entre el tub d'acer i el terreny i, quan aquest formigó s'ha començat a endurir, s'injecta formigó pel tub d'acer a una pressió suficient per trencar la part inferior desplaçant les terres i formant un bulb (Fig.6). Amb aquest sistema s'aconsegueix una resistència per punta superior a la que es pugui obtenir amb un altre. (Monjo Carró, Maldonado Ramos 2001)

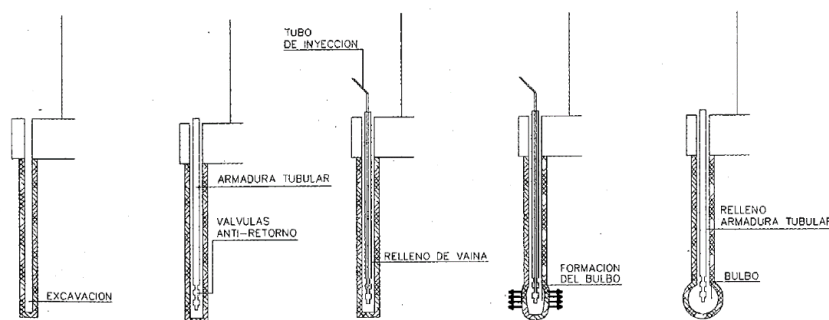


Fig. 6 Micropiló amb bulb injectat a pressió. Font: Monjo Carró, J; Maldonado Ramos, L (2001)

Quan s'han de reforçar fonamentacions profundes s'utilitzen sistemes de pilotatge i micropilotatge que el que fan es reforçar els pilons existents o substituir-los funcionalment, ja que la eliminació dels pilons existents no és una pràctica útil i fàcil de dur a terme.

Tècniques de millora del sòl

Els recalços no són l'única opció a l'hora de millorar la fonamentació, també es pot actuar sobre el terreny i millorar-ne les característiques geotècniques i, conseqüentment, la seva capacitat portant. Aquestes intervencions es poden dur a terme per tal de facilitar l'aplicació d'algun altre procés dels explicats anteriorment, és a dir, de manera temporal, o de manera permanent i sense haver d'actuar en el fonament.

La congelació del sòl és una tècnica que es pot utilitzar de manera temporal, ja que permet treballar sense apuntalaments. Una altra tècnica que es fa servir quan en el terreny hi ha presència d'aigua, és l'eliminació de l'aigua o la limitació i variació del nivell freàtic a través de la col·locació d'un sistema de drenatges, que es pot combinar amb un sistema d'electroòsmosi. (Llorens Duran 1998)

Els sistemes més emprats en la millora del sòl són les injeccions. Consisteixen en la introducció en el terreny d'un material que millori les característiques geotècniques de la zona tractada, redueixi la seva deformabilitat o disminueixi la seva permeabilitat. Això s'aconsegueix omplint buits, desplaçant el terreny existent o creant un nou material a través de la injecció, a una certa pressió i cabal, d'un fluid. Aquest fluid sol ser, o bé, una beurada d'aigua i ciment o aigua, ciment i altres productes com la bentonita, l'argila o la sorra, o bé, una sèrie de productes químics com els gels de sílice o les resines. (Bielza Feliú 1999)

Les resines són solucions de productes orgànics en un dissolvent, capaces de produir, a temperatura ordinària i en un espai tancat, la formació d'un sòlid dotat de les propietats mecàniques adequades. De resines hi ha de diferents procedències, però les que es tracten en aquest treball són les resines expansives.

El disseny de l'operació, tant en la fase teòrica com d'execució, és molt important. Hi ha quatre paràmetres principals que influeixen directament en les característiques i el comportament final de la injecció. Aquests paràmetres són els següents:

Viscositat i enduriment dels materials

La viscositat és la capacitat o la resistència d'un fluid per fluir. En el cas de les injeccions, la viscositat és la que permet que el fluid entri en les fissures i els porus. Com més alta sigui la viscositat més complicada serà la penetració de la mescla en el terreny. Segons el comportament de les mescles que s'utilitzen en les injeccions hi ha dues categories principals:

- Fluids newtonians: els fluids newtonians són aquells que no tenen partícules, és a dir, una solució. El clar exemple de fluid newtonià és l'aigua. En injeccions, es classifiquen com a fluids newtonians les resines i els gels de sílice. Es caracteritzen per una funció lineal $\tau = \eta \cdot D$, del gradient de cisalla (τ) i la resistència al tall (D) on η és la viscositat del material (Fig.7) (Bielza Feliú 1999)
- Fluids de Bingham: els fluids de Bingham són aquells que tenen partícules en la seva composició, anomenats també com a suspensions. El morter i el formigó són exemples d'aquest tipus de fluids utilitzats en les injeccions. Es caracteritzen per la funció $\tau = \tau_0 + \eta \cdot D$, on la resistència al tall (D) i el gradient de cisalla (τ) són proporcionals entre si, η és la viscositat del material i τ_0 és el límit de flux. (Fig.7) (Bielza Feliú 1999)



Fig. 7 Corbes de flux típiques. Font: Kutzner, C (1996)

Pressió d'injecció

La pressió amb la qual s'injecta un material en el terreny determina el radi efectiu de la injecció. D'aquesta manera es podria considerar que amb una pressió màxima i un radi efectiu el més gran possible, conduirà a un major èxit de la intervenció. Aquesta és una tendència d'opinió representada per Henri Cambefort que considera que s'obté un major èxit utilitzant pressions elevades. (Bielza Feliú 1999)

Kutzner, en canvi, dista d'aquesta teoria. Considera que les fractures produïdes en el terreny a causa d'injectar a altes pressions minimitza l'èxit de la injecció, ja que és complicat que totes

les fractures quedin plenes. Aquesta teoria defensa l'ús de pressions més moderades que no trenquin i desestabilitzin el terreny. (Bielza Feliú 1999)

Les conclusions a les quals arriba Kutzner sobre les pressions adequades per a les injeccions d'impregnació, explicades més endavant, són les següents (Bielza Feliú 1999):

- En un massís rocós amb un sistema de fractures paral·lel a la superfície la pressió ha de ser igual al pes del terreny o a les sobrecàrregues.
- En un massís rocós amb un sistema de fractures inclinades o verticals, la pressió aplicada ha de ser inferior a la pressió amb la qual es generin desplaçaments de la roca.
- En injeccions d'impregnació del sòl, hi ha d'haver una circulació constant del material d'injecció dins del sistema de porus del terreny. La pressió s'ha d'ajustar a la permeabilitat del sòl en funció del material d'injecció.

Radi efectiu

El radi efectiu (R) d'una injecció és el que determina les dimensions de la zona d'injecció, el centre del qual es troba en el punt d'injecció. Aquest queda determinat per la pressió d'injecció (p), el radi de perforació (r), l'amplada de les fractures del terreny ($2a$) i el límit de flux del material injectat (τ_0), segons la següent expressió definida per Walter Wittke. (Bielza Feliú 1999)

$$R = \frac{a \cdot p}{\tau_0} + r$$

Temps d'injecció

El temps d'injecció està relacionat amb els paràmetres descrits anteriorment. És durant aquest temps que el material actuarà des del punt de perforació fins a la distància desitjada, és a dir, el radi efectiu. El principal condicionant del temps d'injecció és la viscositat del material injectat, en el cas de les suspensions de ciment aquest període és d'entre 2 i 4 hores, per les beurades químiques és de 20 a 60 minuts i, en el cas de les espumes i altres materials, el temps d'injecció és només de pocs minuts o, fins i tot, de segons. (Bielza Feliú 1999)

Hi ha 3 tipologies principals de millora del terreny amb injeccions: injeccions d'impregnació, injeccions de compactació o desplaçament i injeccions amb fracturació (Fig.8). En alguns tipus d'injeccions, com les injeccions a altes pressions, es produeixen tots aquests efectes, de manera que es podrien considerar una altra tipologia d'injecció. (Bielza Feliú 1999)

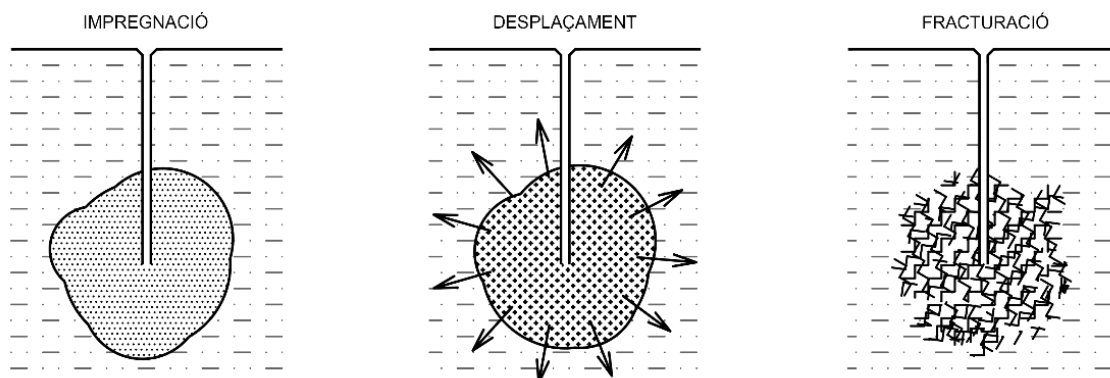


Fig. 8 Tipologies principals d'injeccions. Font: Mitchell, J.K (1981). Elaboració pròpia.

Injeccions d'impregnació

Les injeccions d'impregnació consisteixen a omplir els porus o fractures del terreny amb el material injectat, sense produir canvis en el volum d'aquest.

Injeccions de compactació o desplaçament

En les injeccions de compactació o desplaçament s'introdueixen, en el terreny, materials molt viscosos a altes pressions per tal de desplaçar i comprimir el terreny que l'envolta sense penetrar en ell. És una tècnica que pot produir aixecaments de la superfície.

Injeccions de fracturació

Les injeccions amb fracturació consisteixen en la fracturació hidràulica del terreny a causa de les altes pressions d'injecció i el rebliment dels buits i fissures existents, provocades durant el procés.

Injeccions a altes pressions (Jet-Grouting)

Les injeccions a alta pressió, conegudes com a *Jet-Grouting*, és un procés que consisteix en la injecció d'un material, normalment una barreja d'aigua i ciment, a una pressió molt elevada que produeix el trencament del terreny, forçant així la barreja entre el sòl i el material injectat (Fig.9). (Bielza Feliú 1999)

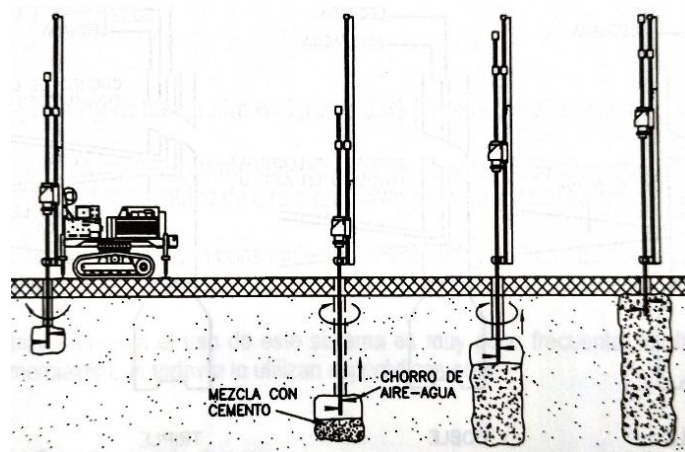


Fig. 9 Esquema del sistema de Jet-Grouting. Font: Bielza Feliú, A (1999)

La normativa europea (EN 12716) distingeix tres sistemes de *Jet-Grouting* (Yepes Piqueras 2020):

- Sistema de fluid únic: la disgregació i cimentació del terreny s'obté a través d'un únic raig de fluid a pressió, que sol ser beurada de ciment.
- Sistema de doble fluid (aire): és un sistema d'injecció doble, primer s'injecta aire a alta pressió que produeix el trencament del terreny i seguidament s'injecta la beurada de ciment a una pressió més baixa.
- Sistema de doble fluid (aigua): és similar al sistema anterior, però en comptes d'utilitzar aire a alta pressió s'utilitza aigua. L'aigua s'injecta a través d'un raig superior i la beurada per un inferior.
- Sistema de triple fluid: és un sistema d'injecció triple. S'injecta aire i aigua a alta pressió pel raig superior i beurada de ciment pel raig inferior. És el sistema més complex, però pot arribar a crear columnes de diàmetres superiors a les dels sistemes anteriors.

3. Injeccions de resina expansiva

La injecció de resina expansiva consisteix en la introducció en el terreny d'una resina expansiva a través d'un conducte d'un diàmetre petit. Aquesta resina, que en un primer moment és en estat líquid, un cop injectada s'expandeix gràcies a una reacció química i exerceix una gran pressió mentre se solidifica. Aquesta pressió i expansió, que afavoreix que s'omplin els buits del terreny entorn del punt d'injecció, millora les característiques del terreny.

Material

El material més utilitzat per la injecció de resina expansiva en el terreny és la família dels poliuretans. El poliuretà és un polímer molt versàtil que té aplicacions en diversos àmbits, en automoció, en mobiliari, en medicina i en construcció entre d'altres. Entre les seves propietats físiques, la que més ens interessa per la seva aplicació al terreny és la capacitat d'expandir-se.

Les resines de poliuretà expansives es produeixen per la reacció exotèrmica entre un polialcohol i un isocianat. Durant aquesta reacció es genera anhídrid carbònic que produeix l'expansió de la mescla formant una estructura espumosa, en la qual queda atrapat el gas en forma de bombolles. Per tal que es produeixi aquesta reacció és necessària la presència d'aigua. Quan no hi ha presència d'aigua s'usa un agent inflable líquid. La reacció se solidifica de manera ràpida, aquest temps de reacció depèn principalment de la resina emprada, els catalitzadors que s'hagin afegit a la mescla i de la temperatura dels seus components. Aquests paràmetres permeten accelerar o retardar la reacció. (Muayad Sabri Sabri et al. 2021)

Els components de la mescla que formen la resina aporten, cadascun d'ells, unes propietats diferents. El polialcohol és l'agent expansiu que contribueix l'augment de volum un cop a començar la reacció, mentre que l'isocianat és l'agent adhesiu que contribueix en la densitat i la solidesa del poliuretà. Augmentant la quantitat d'un reactiu s'aconsegueix que les capacitats derivades d'aquest en el poliuretà siguin majors, però a la vegada es disminueix l'efecte de l'altre reactiu, de manera que la mescla ideal es troba en la relació 1:1 entre ambdós components. (Muayad Sabri Sabri et al. 2021)

Influència del sòl

El comportament de la resina expansiva és diferent segons el sòl en què s'injecti, principalment es diferencia segons si el sòl és granular o cohesiu. Per tal d'entendre com s'expandeix en cada cas s'han estudiat uns assajos realitzats per l'empresa especialitzada en la injecció de resina expansiva URETEK.

En el sòl granular la resina forma un bulb entorn del punt d'injecció. L'alta permeabilitat del sòl permet que el material injectat penetri entre les partícules que formen el terreny. Quan comença la reacció la resina es comença a expandir i solidificar formant un bulb de sòl-resina. La pressió que exerceix la resina en expandir-se compacta el terreny que l'envolta (Fig.10). (Dominijanni, Manassero 2016)

En el sòl cohesiu el comportament és completament diferent. Com que la permeabilitat d'un terreny cohesiu és més baixa, la resina no pot fluir de la mateixa manera que en un terreny granular. La força d'expansió de la resina en el començament de la reacció produeix unes fissures verticals i horitzontals per les quals s'introdueix el material d'injecció. Dins de les fissures la resina s'expandeix pressionant les parets d'aquestes fissures i compactant el terreny que les envolta (Fig.10). (Dominijanni, Manassero 2016)



Fig. 10 Comportament de la resina expansiva en un sòl granular i un sòl cohesiu. Font: Dominijanni, A; Manassero, M (2016)

4. Fonament teòric

El comportament de la resina expansiva en el terreny s'explica mitjançant la teoria de l'expansió d'una cavitat esfèrica o cilíndrica de Yu i Houlsby. (Yu, Houlsby 1991). Aquesta teoria, considerant la cavitat en condicions estàtiques, sosté que l'expansió es produeix de manera esfèrica, generant esforços radials en el terreny entorn del punt d'injecció (Fig.11).

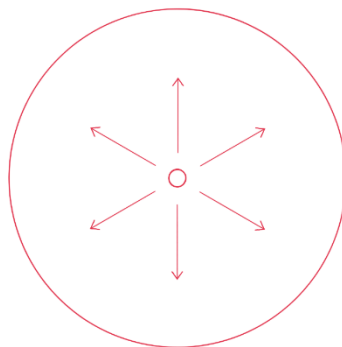


Fig. 11 Expansió d'una cavitat esfèrica. Font: elaboració pròpia.

Per la realització dels projectes s'utilitzen softwares de càlcul basats en aquesta teoria, que tenen en compte les característiques del sòl i de la resina utilitzada i permeten determinar els paràmetres essencials de la injecció: la pressió d'injecció, el volum de resina expandida necessari per assolir l'objectiu i la quantitat de resina a utilitzar.

L'objectiu de la injecció determina els esforços que es tenen en compte a l'hora del càlcul teòric. En termes generals, una injecció de resina per millorar la fonamentació pot tenir els següents objectius: millorar del sòl comprès dins el bulb de pressions dels fonaments, aconseguir arribar a un estrat amb les propietats mecàniques adequades o resoldre problemes deguts a un assentament diferencial de la fonamentació (Fig.12).

En el primer cas, per tal d'augmentar la capacitat portant del terreny cal assolir tot el volum del bulb de pressions, de manera que es tenen en compte, principalment, les tensions horitzontals i les verticals descendents. En el segon cas, es consideren les tensions verticals descendents, que són les que creixen en la profunditat i permeten arribar als diferents estrats del terreny. Les tensions verticals ascendents s'utilitzen, en l'últim supòsit, per poder fer front a l'assentament diferencial i recuperar l'horitzontalitat de la fonamentació i, en els altres casos, per controlar i si fos el cas, ajustar els nivells de la fonamentació durant la intervenció (Fig.12).

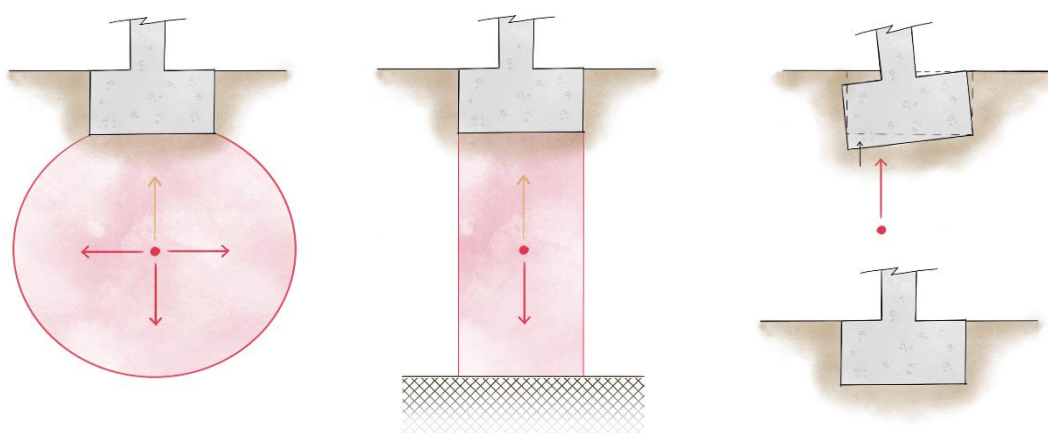


Fig. 12 D'esquerra a dreta. Millora del sòl del bulb de pressions. Arribar a un estrat amb les propietats mecàniques adequades. Resoldre problemes d'assentament diferencial. Font: Elaboració pròpia.

5. Implantació en obra

Les injeccions de resina expansiva s'apliquen principalment per resoldre problemes d'enfonsament de la fonamentació i assentaments diferencials, encara que també es poden aplicar en altres casos com la millora de les característiques mecàniques i hidràuliques del sòl de fonamentació i la millora de la resposta sísmica de l'edifici.

La recerca dels processos i tècniques que es duen a terme en la implantació de les injeccions de resina expansiva en el terreny s'ha fet mitjançant l'anàlisi dels recursos que faciliten les empreses especialitzades URETEK i GEOSEC, sobre les seves tècniques patentades Urettek Deep Injections® i SEE&SHOOT®, respectivament.

El procediment que utilitzen aquestes dues empreses en les injeccions en el terreny té similituds i diferències. La similitud és en el procés general d'execució, mentre que les diferències principals es troben el sistema d'injecció i en el sistema de control d'execució.

Abans de qualsevol procediment a l'obra, s'ha de tenir un coneixement profund del terreny per tal d'avaluar quina serà la profunditat de tractament en cada un dels punts així com la quantitat de resina que s'haurà de fer servir. També és important conèixer la situació de les instal·lacions que passen per la zona de treball per tal de no afectar-les en el moment de perforar.

Un cop a l'obra, es procedeix a executar una sèrie de perforacions d'un diàmetre comprès entre 20 i 30 mil·límetres i separats entre ells una distància d'entre 0,5 i 1,5 metres. Aquestes perforacions es realitzen a través de la fonamentació existent per poder arribar exactament al volum de terreny desitjat. Sempre que sigui possible es faran les perforacions per l'exterior de l'edifici (Fig.13).

Seguidament, s'insereixen els tubs d'injecció a través dels quals, posteriorment, s'injecta la resina expansiva en estat líquid per tal que penetri en els buits del terreny. Les injeccions es duen a terme de manera intermitent per tal de poder tenir un bon control del procés. Durant tot el procediment, hi ha un sistema de control que permet controlar el comportament del terreny en tot moment, així com verificar l'eficàcia del tractament un cop finalitzat el procés d'expansió de la resina (Fig.13).



Fig. 13. Procediment de les injeccions de resina. D'esquerra a dreta. Perforació, col·locació dels tubs d'injecció, injecció de la resina i monitorització làser, comprovació dels resultats amb assaig de penetració. Font: Uretek

Pel que fa al sistema d'injecció, l'empresa GEOSEC utilitza un sistema d'injeccions multinivell que consisteix en la injecció a diverses profunditats mitjançant una cànula amb un sol orifici final, mentre que l'empresa URETEK utilitza el seu sistema patentat i anomenat Uretek Multipoint® que consisteix en la injecció de resines a través d'una cànula amb diversos forats laterals pels quals la resina surt simultàniament, garantint un tractament més homogeni de tot el terreny (Fig. 14).

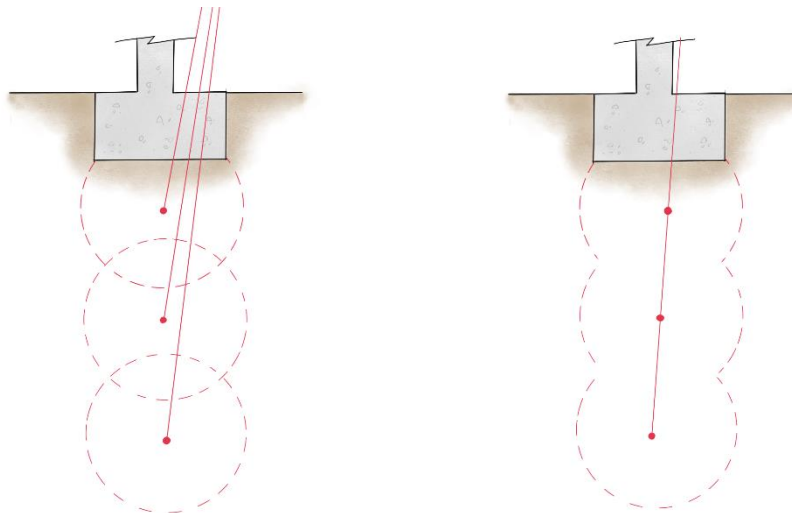


Fig. 14 D'esquerra a dreta. Sistema d'injecció multinivell. Sistema Uretek Multipoint®. Font: Elaboració pròpia.

En el control de l'execució l'empresa URETEK fa ús de diferents mètodes segons el tipus d'intervenció, però principalment controla l'estructura de l'edifici en tractament a través de sistemes puntuals com el làser o globals com el radar que registren dades, de diversos punts de l'edifici en els quals s'ha col·locat un receptor, de manera constant i a temps real. Un altre mètode que els permet identificar millor els punts a tractar i controlar quins punts han sofert l'expansió de la resina durant l'execució és la realització d'una tomografia elèctrica 2D o 3D, que mesura la resistivitat del terreny, de la zona afectada per les injeccions.

L'empresa GEOSEC ha inventat un mètode de control de les injeccions de resina expansiva basat en l'ús de la Tomografia ERT 4D LIVE durant tota la intervenció. La tomografia de la resistivitat elèctrica 4D és un mètode d'estudi geofísic que permet determinar la distribució de la resistivitat elèctrica dels volums del subsol analitzat (Fig.13).

La resistivitat elèctrica és la propietat dels materials d'oposar-se al pas d'un corrent elèctric, de manera que un material molt conductor tindrà una resistivitat elèctrica més baixa que un material

poc conductor. Per poder aconseguir una imatge de la resistivitat del terreny, es col·loquen una sèrie d'elèctrodes organitzats segons una geometria ja estudiada. A través d'un parell d'elèctrodes, s'injecta un corrent elèctric directe i es mesura, de manera simultània, la diferència de potencial elèctric entre tots els elèctrodes. La diferència de resistivitat present en cada zona permet reconstruir, mitjançant un model matemàtic, la forma, posició i resistivitat de les diferents litologies en una imatge tridimensional amb una escala cromàtica per cada volum homogeni. (Geosec 2014)

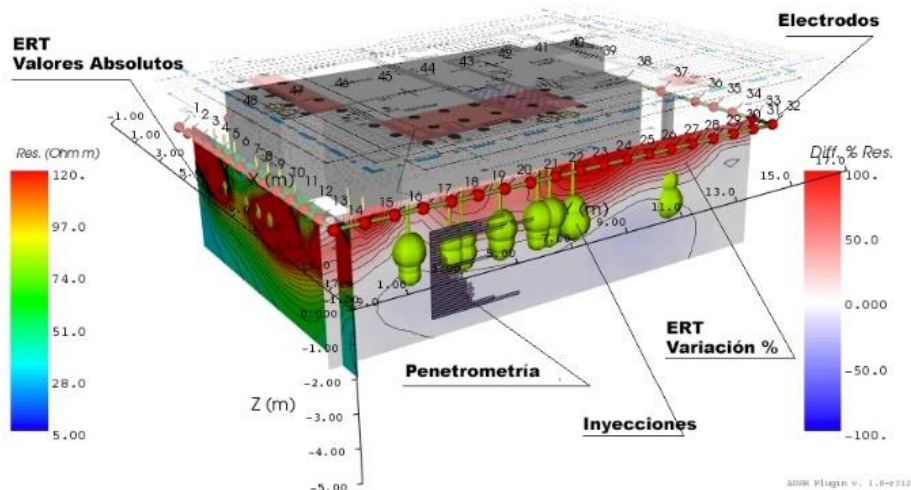


Fig. 15 Imatge del model numèric de GEOSEC. Font: Geosec

Aquesta tècnica superposada amb altres dades conegudes del terreny i dels moviments de l'edifici, permet al tècnic avaluar les causes de l'assentament de l'edifici, planificar en detall la intervenció, controlar, durant tot el procés d'execució, el comportament del terreny i verificar les condicions finals del sòl després del tractament de consolidació amb les injeccions de resina (Fig.14). (Geosec 2011)

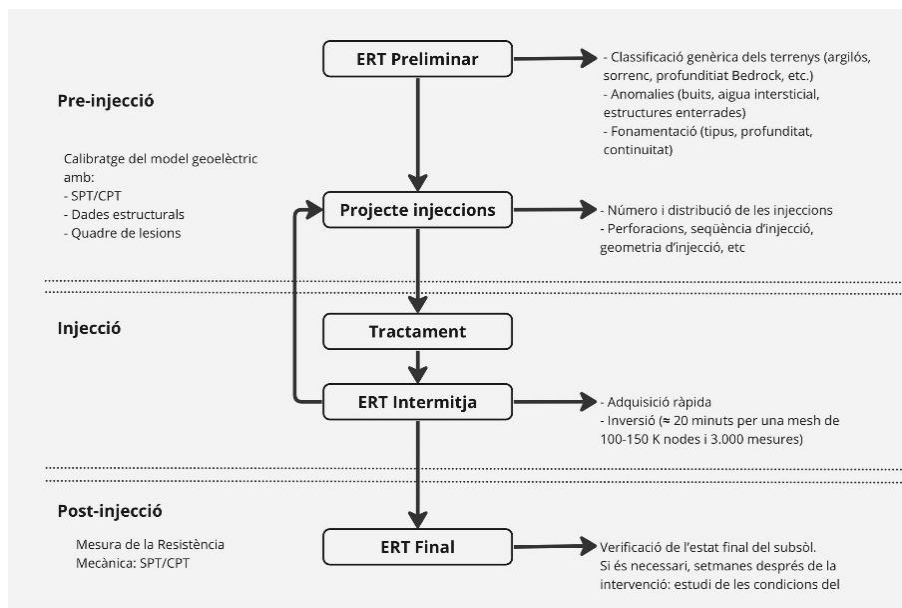


Fig. 16 Procediment d'intervenció Geosec. Font: Geosec (2011) Elaboració pròpia.

Ambdues empreses coincideixen en el fet que s'han de realitzar assajos geotècnics de penetració, de resistència i deformacions del sòl abans i després de la intervenció per tal de poder avaluar l'increment efectiu de resistència i les capacitats mecàniques del terreny obtingudes amb la injecció de resina expansiva. Els assajos de penetració dinàmica consisteixen en penetrar en el sòl a base de cops, com més cops es necessitin per penetrar, més resistent és el terreny.

6. Estudi de casos

S'han estudiat diversos casos duts a terme per les empreses especialitzades GEOSEC i URETEK per tal de verificar l'eficàcia d'aquesta tècnica d'injecció de resina expansiva per la millora de la fonamentació.

Real Fàbrica de Tabacs – Universitat de Sevilla

Tecnologia: SEE&SHOOT®

Localització: Sevilla

Estat Previ: Edifici del segle XVIII construït de pedra. Arquitectura industrial de l'Antic Règim. El terreny de fonamentació és cohesiu, argilós i de consistència dèbil. Apareixen diverses esquerdes i fissures que han provocat que el tancament hagi baixat entre 1 i 3 centímetres en tota la seva longitud. Fet que condueix a un problema d'assentament diferencial.

Intervenció: En primer lloc, es va fer una tomografia de resistivitat elèctrica (ERT) per poder fer una diagnosi més detallada de les característiques del sòl, així com assajos de penetració dinàmica. La intervenció es va realitzar per la part interior de l'edifici i tractant 210 metres lineals de fonamentació. Les injeccions van ser fetes a multinivell en tres nivells diferents.

Resultats: En aquestes imatges de la tomografia ERT es pot observar una clara millora del terreny i com en alguns punts pròxims a la superfície de la tomografia inicial no hi havia resistivitat, és a dir, fonamentació, en la tomografia del final de la intervenció hi ha hagut un augment de la resistivitat d'un 40% (Fig.15).

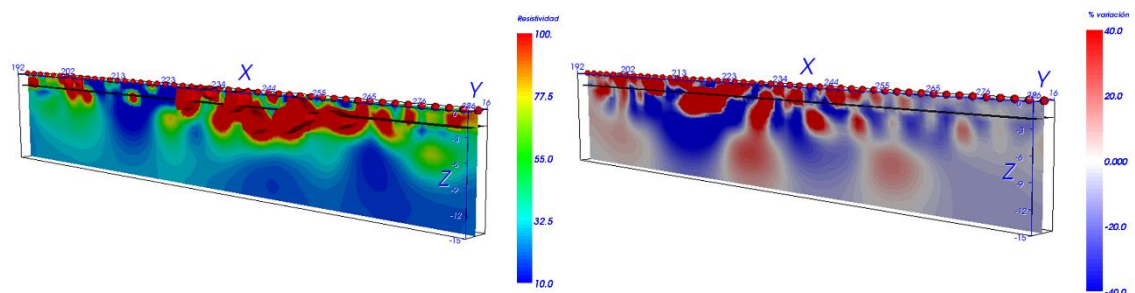


Fig. 17 D'esquerra a dreta. Termografia ERT abans de la intervenció. Imatge de variació de resistivitat elèctrica després de la intervenció. Font: GEOSEC®

Amb els resultats obtinguts de la penetració dinàmica abans i després de la intervenció es veu de manera clara una millora de la resistència i de la capacitat portant del terreny, sobretot en els nivells en els quals s'ha injectat la resina, que queden representats en els pics (Fig.16).

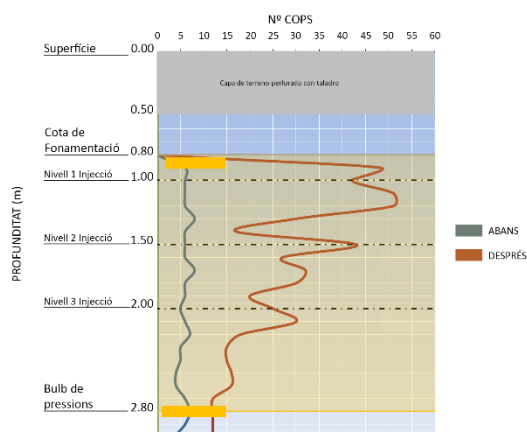


Fig. 18 Resultats dels assaigs de penetració abans i després de la intervenció. Font: GEOSEC®

Punta della Dogana

Tecnologia: Uretex Deep Injections®

Localització: Venècia

Estat Previ: Durant treballs de rehabilitació d'un dels murs es produeixen enfonsaments sobtats del mur de contenció del moll i la part posterior de l'edifici monument de l'antiga Duana. Es reactiva alguna antiga lesió que provoca fissures i esquerdes noves en les parets, els murs de contenció i les escales.

Intervenció: Consolidació del sòl de fonamentació amb injeccions de resina expansiva sense intervenir directament amb les estructures muràries existents. La intervenció es divideix en dues fases: una compactació superficial en la qual s'injecta resina enmig de la fonamentació per tal d'omplir els grans buits presents en l'espai entre la fonamentació i el terreny, i una consolidació en profunditat en la qual s'injecta en el volum de terreny afectat per les càrregues per tal de millorar-ne la capacitat portant. Es realitzen injeccions fins a 7 nivells de profunditat (Fig.17).

Resultats: En els resultats obtinguts dels assajos abans i després de la intervenció s'observa que abans de la intervenció la resistència del terreny era molt baixa i que, després de la injecció de resina expansiva, la resistència ha augmentat significativament (Fig.17).

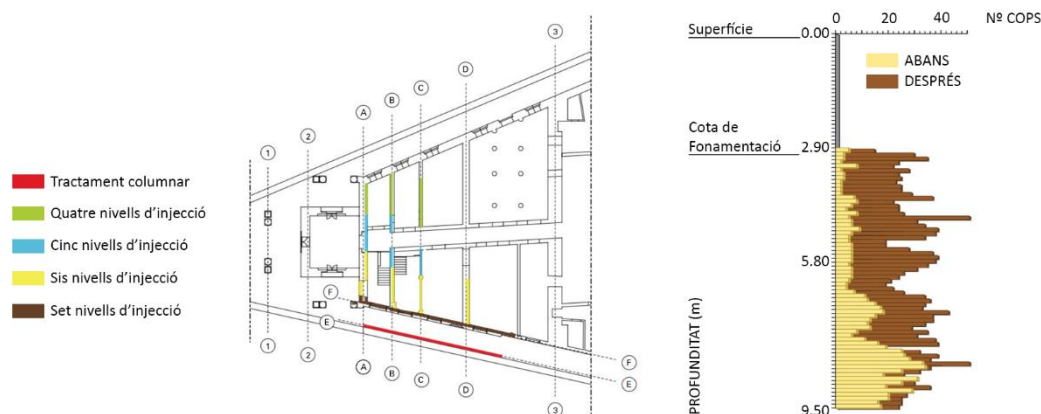


Fig. 19 D'esquerra a dreta. Plànol de la intervenció a Punta della Dogana. Resultats dels assajos de penetració abans i després de la intervenció a Punta della Dogana. Font: Uretex®

Museu d'Història Natural de París

Tecnologia: Uretex Deep Injections®

Localització: París

Estat Previ: El col·lapse de l'edifici es produeix en l'edifici que ocupa la Galeria de Paleontologia que té una estructura de gairebé 100 metres de longitud. Entre les dues guerres mundials va començar a mostrar símptomes de debilitat. L'edifici va anar empitjorant de manera constant fins que van aparèixer fissures i esquerdes amb una obertura d'entre 10 i 20 mm (Fig.18).

Intervenció: En els primers sondejos que es van fer es va veure que el sòl de fonamentació havia perdut consistència de manera generalitzada. Amb les injeccions de resina expansiva es va compactar el terreny millorant les seves característiques de cohesió i resistència a la compressió.

Resultats: En l'assaig de penetració previ a la intervenció, es pot observar que el terreny més proper a la superfície tenia una resistència molt elevada, mentre que augmentant en profunditat la resistència disminuïa. En aquests nivells són en els que es va intervenir per tal de poder donar al terreny una resistència similar a la de les capes superiors. Amb aquesta anàlisi comparatiu entre l'abans i el després de la intervenció es pot veure com s'han obtingut els resultats buscats (Fig.18).

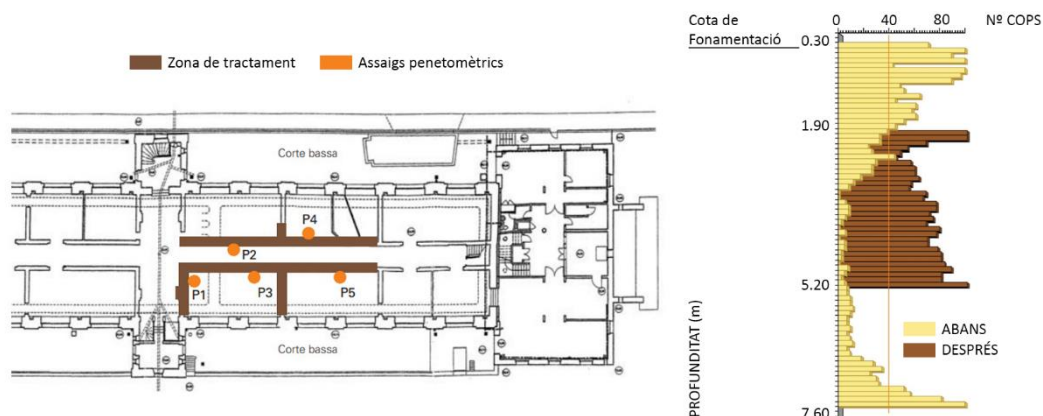


Fig. 20 D'esquerra a dreta. Plànol de la intervenció al Museu d'Història Natural de París. Resultats dels assaigs de penetració abans i després de la intervenció al Museu d'Història Natural de París. Font: Uretex®

Palatium Vetus

Tecnologia: Uretex Deep Injections®

Localització: Alessandria

Estat Previ: Edifici històric més antic de la ciutat construït el 1170. Al llarg dels anys l'edifici ha passat per diverses restauracions i ampliacions que han modificat l'estructura i, conseqüentment, l'estat tensional del sòl de fonamentació.

Intervenció: L'augment de càrregues sobre la fonamentació existent requereix l'augment de la capacitat de càrrega d'aquesta o del terreny. En el disseny original s'optava per una fonamentació profunda mitjançant micropilons, però per tal d'afectar el mínim possible a l'estructura de l'edifici es va acabar optant per les injeccions de resina expansiva. El procés es va dividir en dues fases, compactació superficial i consolidació en profunditat, igual que amb l'edifici Punta della Dogana, però amb 4 nivells d'injecció. La intervenció, a diferència dels casos anteriors, es realitza pràcticament en tota la fonamentació de l'església. (Fig.15).

Resultats: En el gràfic comparatiu dels resultats obtinguts dels assajos de penetració realitzats abans i després de la intervenció s'observa que abans de la intervenció el terreny tenia una resistència baixa i similar en els diversos nivells de profunditat. Després de la injecció de resina expansiva, aquesta resistència varia de manera escassa en els nivells més pròxims a la fonamentació i augmenta exponencialment amb la profunditat, dotant al terreny d'unes característiques millorades respecte de les anteriors a la intervenció.



Fig. 21 D'esquerra a dreta. Plànol de la intervenció al Palatium Vetus. Resultats dels assajos de penetració abans i després de la intervenció al Palatium Vetus. Font: Uretek®

7. Conclusions

Aquest article d'investigació va sorgir amb la intenció d'ampliar coneixements en l'àmbit de la rehabilitació estructural dels edificis, més concretament en el reforç de la fonamentació. Aquesta, en ser el suport de l'edifici, és un element on resulta complex intervenir. Des d'un inici, amb els pocs coneixements que tenia sobre el tema, ja considerava que la tècnica d'injecció de resina és una millor manera d'intervenir en la fonamentació que els recalços tradicionals, perquè és una solució menys agressiva per l'edifici.

Com s'ha investigat, els recalços tradicionals, sobretot els que comporten la intervenció per sota de la fonamentació existent, comprometen la integritat i estabilitat global de l'edifici, ja que requereixen l'estintolament i la transmissió de càrregues a un altre punt de suport. Amb aquests mètodes es debilita l'estructura temporalment, una estructura que no és capaç de suportar adequadament les càrregues que actuen sobre ella. Qualsevol intervenció que comporti que el fonament deixi de treballar és una solució que compromet l'edifici.

A mesura que s'avança en l'article, les tècniques d'intervenció que s'expliquen resulten menys agressives per l'edifici. La intervenció amb pilons i micropilons és més favorable que les anteriors, ja que permet que la fonamentació existent estigui treballant en tot moment. Però, durant el període d'execució amb la maquinària que s'utilitza, es produeixen vibracions que poden afectar i debilitar encara més l'estructura a reforçar.

La injecció de resina expansiva, a diferència d'altres injeccions com el Jet-Grouting, que trenca el terreny i el substitueix, és una solució òptima per resoldre problemes de la fonamentació. És una tècnica que no intervé en el fonament, sinó en el terreny, de manera que els fonaments existents estan treballant sempre i, a diferència de totes les tècniques anteriors, serveix per resoldre problemes d'assentament diferencial. A més a més, no només serveix per resoldre problemes derivats de l'augment de càrrega o de deficiència de la fonamentació, sinó que és una solució per problemes del terreny com la pèrdua de propietats mecàniques o la presència d'aigua.

Tanmateix, és un sistema que no funciona per tots els tipus de sòls, de manera que caldrà un bon coneixement del terreny per escollir la tècnica a aplicar.

Per altra banda, el procés d'execució de la tècnica d'injecció de resines, és un procés senzill i ràpid, amb la mínima intervenció en l'estructura on la màxima dificultat és en el control. Tal com s'ha pogut observar en els casos d'estudi, sempre que és possible s'intervé per l'exterior de l'edifici permetent que es pugui mantenir l'activitat durant l'execució.

Amb la investigació sobre la tècnica i l'anàlisi dels casos d'estudi s'ha pogut validar la hipòtesi inicial. La injecció de resina és una tècnica més amable amb l'edifici que el recalç tradicional, que millora radicalment la capacitat portant del terreny, tal com es pot veure en els resultats dels assajos de penetració abans i després de la intervenció dels casos d'estudi.

La investigació s'ha basat a comprendre molt bé com funcionen totes les tècniques i, especialment la injecció de resina expansiva, per poder-ho explicar de manera clara i entenedora per a tot aquell que no en sigui expert. D'aquesta manera es pot donar més a conèixer la tècnica per tal de ser aplicada més sovint, ja que és una tècnica molt favorable per les intervencions en fonamentació.

8. Bibliografia

- Bielza Feliú, Ana. 1999. "Capítulo 5: Inyecciones". En Manual de técnicas de mejora del terreno, editat per Carlos López Jimeno, 151-250. Madrid: Carlos López Jimeno.
- Cervelló i Delgado, Santiago. 1998. "Recalç en profunditat". En *Manual de geotècnia i patologia, diagnosi i intervenció en fonaments*, editat pel Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes de Lleida, 129-136. Barcelona: CAAT
- de Llorens Duran, Josep Ignasi. 1998. "Recalç en superfície". En *Manual de geotècnia i patologia, diagnosi i intervenció en fonaments*, editat pel Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes de Lleida, 123-128. Barcelona: CAAT
- Dominijanni, Andrea., Manassero, Mario. 2016. *Consolidación de terrenos con resinas expansivas. Guía de proyecto*. Madrid: Uretex
- Echeverría, Ernesto., Celis, Flavio., da Costa, Fernando. 2002. "Las particularidades específicas del recalce de cimentaciones en el patrimonio arquitectónico". En *Actas I Congreso del GEIIC, Conservación del patrimonio: evolución y nuevas perspectivas*, editat pel Grupo Español del IIC, 235-240. Madrid: Grupo Español del IIC.
- Echeverría, Ernesto., Celis, Flavio., da Costa, Fernando. 2007. "La intervención bajo rasante, la importancia de su conocimiento. La técnica de la inyección armada". *Informes de la Construcción* 59 (505): 21-35. 10.3989/ic.2007.v59.i505.498
- Geosec. "Geosec Ground Engineering". Inyección de resinas expansivas. <https://www.geosec.es/cimentaciones-especiales/inyeccion-de-resina/>
- Geosec. "Geosec Ground Engineering". Planificación y control. <https://www.geosec.es/cimentaciones-especiales/inyeccion-de-resina/planificacion-y-control/>
- Geosec. 2011. *Consolidación del terreno con resina expansiva: evaluación de la eficiencia*. Madrid: Geosec.
- Geosec. 2014. *Il método della tomografia di resistività elettrica*. Parma: Geosec.

- Geosec. 2014. *La tomografia della resistività elettrica nei consolidamenti con resine espandenti*. Parma: Geosec.
- Geosec. *Ficha Técnica ES 125/1114 Real Fábrica de Tabacos-Universidad de Sevilla*. Madrid: Geosec España S.L.
- Jiménez Salas, José A. 1980. *Geotecnia y cimientos III*. Madrid: Rueda.
- Mañà i Reixach, Fructuós. 1995. *Recomanacions per al reconeixement, la diagnosi i la teràpia de fonaments*. Barcelona: Institut de Tecnologia de la Construcció de Catalunya.
- Mañà i Reixach, Fructuós. 1998. "Una reflexió a l'entorn de les tècniques d'intervenció". En *Manual de geotècnia i patologia, diagnosi i intervenció en fonaments*, editat pel Col·legi d'Aparelladors i Arquitectes de Lleida, 123-128. Barcelona: CAAT
- Monjo Carró, Juan i Maldonado Ramos, Luis. 2001. *Patología y técnicas de intervención en estructuras arquitectónicas*. Madrid: Munillalería.
- Muayad Sabri Sabri, Mohanad., Ivanovich Vatin, Nikolai., Abood Mohammed Alsaffar, Kifayah. 2021. "Soil Injection Technology Using an Expandable Polyurethane Resin: A Review". *Polymers* 13 (3666). <https://doi.org/10.3390/polym13213666>
- Sánchez Carrasco, Rafael. 2016. "Recalce de Cimentaciones mediante Inyección de Resinas". Treball de Final de Grau, Escuela Técnica Superior de Ingeniería de la Universidad de Sevilla.
- Uretek. 2006. *Dimensionamento di un intervento, Uretek Deep Injections, con iniezioni di resina Uretek Geoplus*. Bosco Chiesanuova: Uretek IT.
- Uretek. 2020. *Catalogo General Uretek España*. Madrid: UretekOnline. https://issuu.com/uretek-online/docs/uretek_espana
- Yepes Piqueras, Víctor. 2019. "Inyecciones de alta presión: Jet grouting" El blog de Víctor Yepes, 2 de juliol de 2019. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2019/07/02/jet-grouting/>
- Yepes Piqueras, Víctor. 2020. "Técnicas de inyección del terreno" El blog de Víctor Yepes, 9 de juny de 2020. <https://victoryepes.blogs.upv.es/2020/06/09/tecnicas-de-inyeccion-del-terreno/>
- Yu H.S., Houlsby G.T., 1991. Finite cavity expansion in dilatant soils: loading analysis. *Géotechnique* 41 (2), 173-183.