

La intervención bajo rasante, la importancia de su conocimiento. La técnica de la inyección armada

The intervention under soil level, the importance of its knowledge. The technique of the reinforced grouting

Fernando da Casa^(*), Ernesto Echeverría^(*), Flavio Celis^(*)

RESUMEN

La intervención en la edificación bajo rasante, es un capítulo pendiente en el desarrollo habitual de los asuntos de la edificación, más cuando en toda intervención edificatoria es pertinente la participación de Arquitectos y Arquitectos Técnicos. La necesidad de conocimiento y correcta aplicación de técnicas y sistemas se pone de manifiesto constantemente. En este documento se presenta la situación actual y una de las técnicas de aplicación, generalmente desconocida: las inyecciones armadas. Las inyecciones armadas es una técnica de tratamiento de mejora del terreno, mediante la ejecución de inyecciones controladas utilizando la técnica de tubos manguitos, (técnica conocida y aplicada en el campo de la ingeniería), pero con muy poca difusión en la edificación, si bien, es una técnica de gran aplicación en este ámbito, no solamente en el caso de rehabilitación o recalce de cimentaciones, sino también en la edificación de nueva planta.

La situación actual parte del desconocimiento del campo de las inyecciones aplicadas a la edificación, y más en las actuaciones de recalce de cimentación, que afecta al funcionamiento del sistema, y a las dificultades para su ejecución y control por parte de los técnicos participantes. El desconocimiento, en general de esta temática por parte de los profesionales de la edificación, le da una mayor importancia al tema. Se plantea realizar una exposición que permita, poder establecer una documentación, no solo explicativa, sino justificativa del funcionamiento del sistema, que permita su difusión y comprensión por parte de los técnicos participantes en el proceso edificatorio.

470-7

Palabras clave: recalces, inyección armada, metodología, edificación, geotecnia.

SUMMARY

The implementation of below grade construction techniques for buildings is an outstanding issue in routine building practice, particularly when any manner of building construction entails the participation of architects and associate architects. The need for an understanding and correct application of techniques and systems surfaces on a regular basis. This paper addresses the present situation and one fairly unknown technique: reinforced grouting. Reinforced grouting is a technique designed to improve the terrain via the controlled injection of grout through pipes fitted with check valves. While well known and frequently employed in engineering, this technique is seldom used in building construction. Nonetheless, it has considerable potential in this domain, not only for rehabilitating and underpinning existing foundations, but also in below grade operations in new construction.

The present situation stems from the unfamiliarity with the application of the reinforced grouting to building construction, particularly for foundation underpinning, which affects not only system operation, but the difficulties involved in its implementation and control by the professionals participating in the process. The widespread unfamiliarity with this matter on the part of building construction professionals corroborates the importance of the subject of this article. The aim is to broach the issue in a manner that establishes documentation that not only explains but justifies system operation, thereby furthering awareness and understanding of the questions at hand by the professionals involved in building construction.

Keywords: underpinning, reinforced grouting, methodology, building, geotechnical

^(*)Dpto. Arquitectura. Grupo de Investigación "Intervención en el Patrimonio y Arquitectura Sostenible (CTE2006/F34)". Universidad de Alcalá

1. INTERÉS DE LA TEMÁTICA

En la mayoría de las ocasiones en las que se aplica esta tecnología, se produce el hecho de que la dirección técnica se ve obligada a ir por detrás de la obra, de quedar en manos de asesores externos, e incluso las más de las veces dependiendo directamente de la Empresa especializada que se consulte y/o ejecute la actuación.

El desconocimiento, en general de esta temática por parte de los profesionales de la edificación, puede implicar “el miedo” a utilizar técnicas no conocidas, así como la falta de su posible control en el caso de verse en la obligación de su aplicación, lo que confiere una mayor importancia a la necesidad de abordar el tema de este trabajo. Las inyecciones han tenido desde su origen un uso fundamental en el campo de la ingeniería, obra civil, o infraestructuras, y han sido ingenieros los principales investigadores y fomentadores de esta técnica.

Sin embargo, este tipo de técnicas son de gran aplicación en el campo de la edificación, si bien hasta el momento han sido aplicados, fundamentalmente, en actuaciones motivadas por la aparición de lesiones relacionadas con la cimentación, esto es en recalces por razones patológicas, también se han conocido actuaciones relativas a la edificación de nueva planta. Dentro de estas últimas las de más reciente aplicación, son la ejecución de tratamientos para la realización de vaciados, en sustitución de los sistemas tradicionales de contención. A pesar de ello el potencial que tiene este tipo de técnicas una vez que se conocen, es muy amplio, y por ello también se considera de gran interés la investigación en este campo, para poder obtener sistemas más eficaces, poder incrementar las medidas de control, así como la posibilidad de incrementar las aplicaciones actuales, de tal modo que se solucionen algunos de los problemas actuales de la edificación, teniendo en cuenta el crecimiento espectacular de nuestras poblaciones, implica la utilización de cada vez más suelos con grandes problemáticas desde el punto de vista geotécnico, teniendo en cuenta que, en ocasiones, éste ha sido el motivo de su no urbanización en tiempos pasados.

Por todo ello se considera que este tipo de investigación sobre un tema poco desarrollado en el campo de la arquitectura, es de gran interés, y necesario difundirse sus resultados de tal modo que sea accesible a los técnicos que posteriormente los aplicarán, a efectos de ampliar su cultura científica y sus posibilidades de aplicación profesional.

2. EL ESTADO DEL ARTE EN EL CAMPO DE LAS INYECCIONES

El campo de las inyecciones como técnica de mejora del terreno mediante la introducción de un fluido que modifique sus características iniciales, es conocida por todos de un modo muy generalista, esto es, se intuye lo que significa la operación, y lo que se podría pretender con ello, pero se obvia, las más de las veces, que este campo es muy amplio, y que existen múltiples variantes de aplicación, y que, por tanto, el cómo se ejecuten, el qué se introduzca, y lo que se pretende conseguir, implique la aplicación de diferentes sistemas.

También existe una cierta creencia sobre que los tratamientos de terreno son técnicas de reciente aparición, y que por ello no están contrastadas, si bien hay que tener en cuenta que este tipo de actuaciones para mejora de las capacidades del terreno, ya están citados por Vitrubio “... *por ser paraje postizo hasta muy hondo, o fuera paludoso entonces se cavará y vaciará la zanja, y se hincarán dentro estacas de chopo, de olivo, o de roble, chamuscadas, metiéndolas a golpe de máquina. Clavaranse bien espesas, y los intersticios que dexaren se llenarán de carbón. Sobre esta empalizada se construirán los cimientos de estructura solidísima*” (1).

Y si nos referimos en concreto a las inyecciones, éstas han sido aplicadas en recalces de edificaciones de importante interés, como en el caso del recalce de las pilas de la Basílica del Pilar de Zaragoza en 1933 (2).

Esta confusión, muy difundida en el campo de los profesionales del sector, implica en muchas ocasiones, que se generalicen los problemas o defectos de una tipología concreta, para todas ellas, y de hecho esta “mala prensa” ha provocado un gran desconocimiento de las diferentes técnicas y sus posibilidades, y una despreocupación de los técnicos por ellas.

Esto queda patente en una de las publicaciones del campo de la rehabilitación, en el que se refiere: “*Las inyecciones se emplean cada vez menos en el tratamiento de situaciones patológicas, pues la experiencia ha demostrado que las mismas presentan dos incógnitas. La primera es el resultado, en cuanto a lograr la mejora del terreno de una forma homogénea y localizada en la zona que se proyecta tratar. Y la segunda, y no menos importante, es la incógnita de la admisión, que no permite evaluar a priori el costo del tratamiento*” (3), que indica un cierto desconocimiento de las diferentes técnicas, así como de determinados conceptos geotécnicos.

Esto se suma al cierto abandono que se produce en lo relacionado con el conocimiento en el campo de la geotecnia, por parte de un gran número de los profesionales más relacionados con la edificación, si bien ya advertía Alberti que *"tantas son las cosas que van debajo de tierra sin saberse, a las cuales no seguramente someteréis el peso y el gasto del edificio para que le sostengan, y cierto conviene así en todo el edificio, como principalmente en los fundamentos no menospreciéis cosa en que se puede echar de menos la razón y diligencia de un cauto y bien mirado edificador; pues si en algo se hierra en las demás cosas, daña más livianamente y se enmienda más fácilmente y sufre más cómodamente que no en los fundamentos, en los cuales no se puede admitir alguna excusa de error"* (4).

Como nos dice D. Fernando Ripollés el terreno *"para un arquitecto-edificador, es el primer elemento constructivo, e incluso más concretamente, es el primer material con que tiene que contar para realizar sus construcciones"* (5).

Esta manera de entender el terreno, como un elemento constructivo, implica que por parte de muchos técnicos, se planteen en exclusiva como sistemas de aplicación bajo rasante, aquéllos que se pueden entender como tales, esto es, que se introducen como nuevo material, o que tienen una configuración de ejecución similar a sistemas de aplicación sobre rasante (muros, pantalla de hormigón, pilotes,...) y por tanto supuestamente conocidos en general por el técnico.

Esta concepción, junto con la de que el terreno es el receptor universal de cargas, sin considerar la capacidad de respuesta del mismo, y de su comportamiento, como material heterogéneo, con planteamientos muy simplificados de los datos que se necesitan para *"diseñar" una cimentación* (resistencia), implican un gran desconocimiento de la geotecnia aplicada a la edificación, y se convierte, a su vez, en un handicap para poder ampliar nuestros conocimientos sobre otro tipo de técnicas constructivas.

3. EL CAMPO DE LAS INYECCIONES

Dentro del campo de los tratamientos de terreno, el ámbito de las inyecciones es muy amplio, y tiene por principio básico la mejora del terreno por la modificación de sus parámetros geotécnicos mediante la introducción de un fluido.

A la hora de diferenciar los tipos de sistemas de inyección hay que tener en cuenta diversos factores, entre los que hay que tener en

cuenta: el proceso de ejecución, los objetivos del tratamiento, las implicaciones que sobre el edificio se producen, y la forma de tratar la zona de terreno afecta a la cimentación, esto es, la zona del bulbo de transmisión de carga, ya que fundamentalmente el contacto directo del terreno con la cimentación no se ve alterado, ya que al tratar el terreno directamente, no es necesario la colocación de elementos de conexión con la cimentación original.

Haciendo un breve resumen de las tipologías de inyección, más básicas, según su funcionamiento, se podrían citar las siguientes:

- Inyecciones de impregnación, a muy baja presión, incluso nula, con la inserción de un material con densidad similar al agua, y cuya funcionalidad es disminuir la porosidad del terreno, aumentando así su comportamiento impermeable.

- Inyecciones de compactación, a presión media, con la inserción de un material de gran viscosidad, que desplaza el terreno en torno al punto de inyección sin penetrar en sus huecos. Pretenden aumentar la cohesión del terreno por densificación.

- Inyecciones de baja movilidad, similares a las anteriores, pero cuya misión es el relleno de huecos de grandes dimensiones en el terreno, primando su concentración en el punto requerido y su no dispersión.

- Inyecciones de fracturación, a media presión (en ocasiones alta), introduciendo material de baja viscosidad, y que busca la rotura del terreno para la introducción de la lechada de pronto fraguado, produciendo la densificación y rigidización del terreno, creando una red estructuradora del terreno.

- Inyecciones de desestructuración, a muy alta presión, que introducen un material que se mezcla con el terreno, creando columnas de nueva consistencia. Su aplicación más conocida es el *"jet Grouting"*.

Como se puede observar, los diferentes tipos de inyecciones tienen objetivos diferentes, tanto en su comportamiento y tipo de mejora del terreno, como en su propio proceso de ejecución en la obra, lo que implica que una selección inadecuada puede ser fatal para el objetivo de su realización, teniendo en cuenta que son inversiones, literalmente enterradas, que no muestran su fallo hasta que es demasiado tarde.

Hay que incidir en la necesidad de conocer los diferentes tipos de inyecciones, entre las diversas disponibles, ya que cada una de

ellas tienen sus aplicaciones y particularidades, no siendo «intercambiables» en sus aplicaciones. Este aspecto es desconocido para un gran número de profesionales, que identifican todas las inyecciones como una, la que denominan «tradicional», y que suelen considerar como la introducción de material en el terreno sin control, a efectos de relleno.

Una particularidad especial es la especialización de las empresas que las ejecutan. Cada una de ellas tiene mayor o menor versatilidad y experiencia, en las diferentes técnicas de aplicación. No por ello, hay que confundir la especialización en obras geotécnicas, con la factibilidad de ejecutar cualquiera de sus técnicas de aplicación.

Pocas empresas del sector recomiendan, cuando es menester, la utilización de técnicas diferentes a su especialización, aspecto que cuando sucede favorece una mayor dinámica de confianza en la relación entre profesionales.

Esta relación de confianza entre los diferentes protagonistas técnicos y empresa, cobra gran importancia en este campo de actuación, ya que el grado de especialización y la complejidad de los problemas en resolución, implica una necesaria coordinación, comunicación y capacidad de toma de decisiones durante el propio proceso de obra. La buena relación, confianza y profesionalidad no solo favorece este aspecto, sino que se convierte en un requisito para el correcto desarrollo de la obra.

4. UNA TÉCNICA ESPECÍFICA: LA INYECCIÓN ARMADA. FUNDAMENTOS

La técnica de las inyecciones armadas, tiene una gran versatilidad, tanto por su ejecución, como por las diferentes posibilidades de su aplicación, no sólo en el campo de los recalces, como ya se ha referido.

Es una técnica que procede de la aplicación de las inyecciones de impregnación con tu-



Figura 1. Tubos manguito. Válvulas cada 50 cm (cortesía de CDE Arquitectura).

bos “manchettes” (procedentes de la aplicación en el metro de París), y que en España se conoce como “tubos manguitos”. Estos tubos tienen puntos de inyección equidistantes, cada 50 ó 33 cm) con válvulas antirretorno (figura 1), manguitos, que le dan el nombre. Esto permite la realización de la inyección de forma localizada e individualizada en cada punto, así como en repetidas fases (multifase) ya que al estar el interior del tubo siempre limpio, permite la repetición de las operaciones de inyección.

La primera aplicación de los “tubo manguito” en España fue la impermeabilización y consolidación de la base de la presa de Arbón, ejecutada por Rodio, y para lo que se estuvo recopilando información durante la ejecución del metro de París.

La técnica de la inyección armada es una variante de este tipo de aplicaciones. En la década de 1980, partiendo del proceso de ejecución descrito, se experimenta en la fase de diseño, planteando como novedad, la predefinición de una geometría prismática a la que aplicar el tratamiento. En esta zona se definen las características de los parámetros geotécnicos a adquirir. Es la empresa GEOEXPERT (actualmente Cimentaciones y Tratamientos S.A. -CIMTRA-), la que pone en marcha esta nueva filosofía de aplicación de la inyección.

El proceso de ejecución se considera fundamental, con la posibilidad de modificación de los parámetros de inyección durante las operaciones, en función de los datos que se van obteniendo. Con la experimentación sucesiva, y mediante los resultados de las diferentes realizaciones se van planteando diferentes aplicaciones, desde la intervención en cimentaciones de edificios, hasta la ejecución de elementos de contención para vaciados aplicaciones se plantean, y los aspectos de aplicación para tal consecución.

La técnica de ejecución de los “tubo manguito” es utilizada en varios sistemas de inyección, no sólo en las armadas, también en las de impregnación y en las de compensación, con un gran número posible de aplicaciones, incluso dentro del campo de la edificación, si bien hay que referir, que esta técnica específica, no es muy conocida fuera de aquellos técnicos que se dedican expresamente a las obras de su directa aplicación, y relacionadas con Empresas especializadas.

Como diferencia fundamental respecto a las inyecciones de compensación, en las inyecciones armadas, se plantea crear una

zona definida y controlada de terreno tratado, prisma (figura 2), definida con carácter previo al diseño del tratamiento, y en la cual, mediante la aplicación de una serie de inyecciones de fracturación con la utilización de los tubos manguito, y con la introducción del material adecuado (en función del tipo de terreno), se producirá la modificación de los parámetros geotécnicos, consiguiendo dotar al prisma de terreno tratado de una gran homogeneidad, aumentado la cohesión y el ángulo de rozamiento interno, dotando al conjunto con una estructura interna, que permite un mejor comportamiento mecánico respecto al correspondiente al terreno natural.

El sistema para realizar el tratamiento en el prisma predefinido, se basa en tres funda-

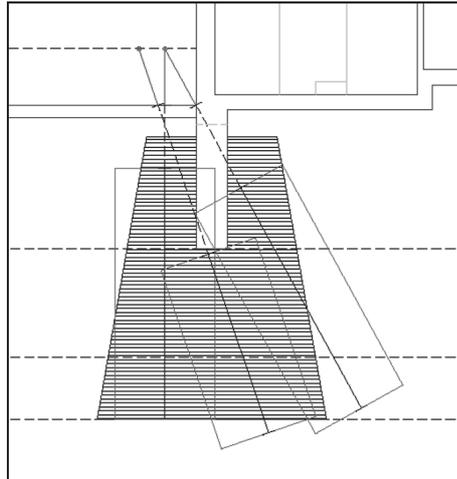


Figura 2. Esquema básico de Prisma de Tratamiento (corteza de CDE Arquitectura).

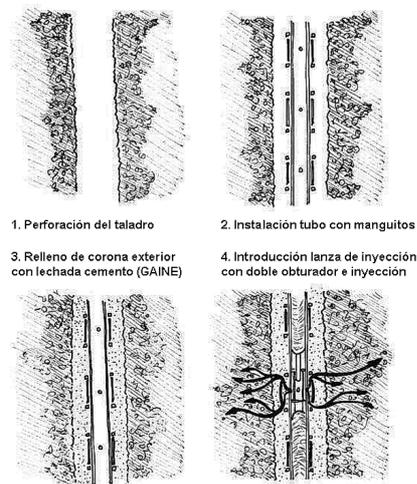
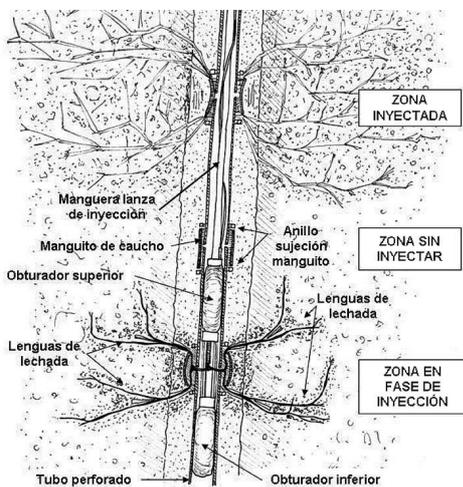


Figura 3. Sistema de ejecución de la inyección en cada manguito (cortesía de CIMTRA).

mentos principales, relacionados directamente con los diferentes conceptos en los que se basa su comportamiento:

- El primer concepto es la rotura hidráulica del terreno. Esta rotura se lleva a cabo en forma controlada (figura 3) de modo que las deformaciones se escalonen.

Este proceso permite el tratamiento con mezclas estables a base de cemento, de suelos cuya textura impediría la impregnación incluso por mezclas químicas de baja viscosidad. La utilización del tubo manguito favorece un control muy preciso de las deformaciones inducidas en el subsuelo al controlar volúmenes y presiones en cada uno de los puntos.

- El segundo concepto es la consolidación del terreno por presión y estructuración. La regulación del caudal de inyección forzado por rotura del terreno, permite la aplicación de presiones «estáticas» crecientes, hasta la presión última de cierre de cada manguito

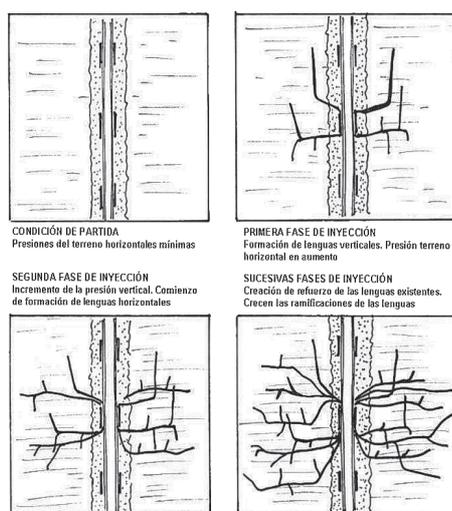


Figura 4. Sistema multifase de inyección (cortesía de CIMTRA).

que se prefija según la profundidad y los requerimientos de cada caso. Estas presiones producen la consolidación de los pequeños dominios de terreno (de dimensión centimétrica) comprendidos entre lenguas de lechada (figura 4).

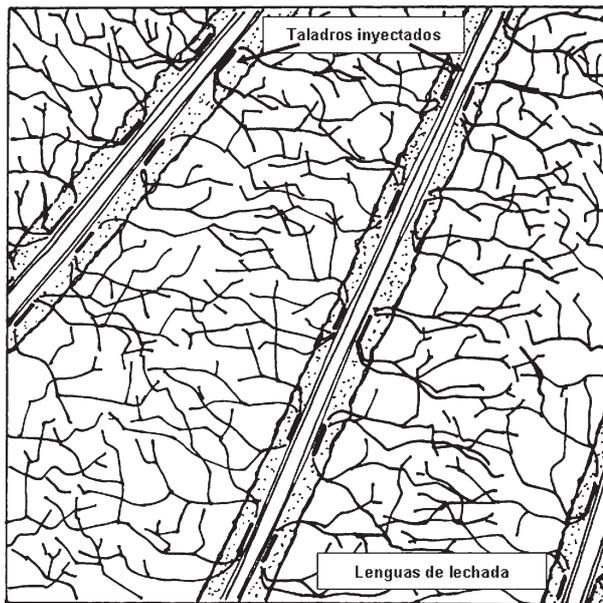


Figura 5. Interrelación entre lenguas de taladros (cortesía de CIMTRA).

El resultado de este proceso consiste en la inclusión en el terreno de un esqueleto de lenguas de cemento endurecidas entre las cuales se aprisiona una porción de suelo consolidado, y cuya estructuración irá en función de cada una de las fases, y de la resistencia que se oponga a la penetración de la lechada (figura 5).

En los suelos arcillosos se puede apreciar el efecto de la consolidación en el proceso de expulsión del agua intersticial. En los casos en los que se han ejecutado perforaciones de alivio de estas presiones intersticiales, posicionadas entre las alineaciones de perforaciones de inyección, se ha registrado durante el tratamiento, una afluencia marcada de agua que cesa cuando se produce el fraguado de la mezcla inyectada.

- Y por último el tercer concepto es el armado del terreno tratado por los tubos de inyección. Los tubos de acero del tratamiento quedan al final del mismo, íntimamente asociados al volumen de terreno tratado.

La disposición de los tubos se prefija en abanico, de modo que la máxima distancia entre tubos, dentro del volumen del suelo a tratar, sea inferior siempre a dos veces el radio de acción de la inyección.

Este último se ha contrastado repetidamente en suelos de naturaleza muy diversa (gravas, arenas, arcillas) mediante el examen directo en excavaciones del suelo tratado, observándose que es mucho más dependiente de la resistencia del terreno y de las presiones de inyección que de la textura más o menos fina del suelo, circunstancia ésta

previsible por tratarse de un tratamiento de rotura y consolidación, no de impregnación del suelo.

La combinación de inyecciones de mejora del terreno, y el cosido del mismo, mediante elementos resistentes a tracción permite resolver problemas complejos, tanto de estabilidad del terreno en laderas como de recalce de elementos estructurales, emplazados en estas zonas, y sujetos a limitaciones muy estrictas de movimiento, tanto en dirección vertical como en dirección horizontal.

Las inyecciones armadas son inyecciones a baja presión, y con una gran capacidad de control, lo que permite ejecutar el recalce hasta el nivel de firme considerado, sin necesidad de establecer una conexión estructural entre cimentación defectuosa y elementos de recalce.

Esta faceta, junto con su proceso de ejecución, permite que se pueda efectuar el recalce desde el exterior de las construcciones (hasta distancias en torno a los 20 m, límite marcado por la capacidad de controlar la posición real de la perforación), sin afectación a la funcionalidad de las mismas, y especialmente manteniendo la ocupación de los edificios en tratamiento, y por ello minimizando costes de reposición de acabados, desalojos,... (figura 6).

La distribución de los taladros se realiza siempre en agrupaciones, generalmente conformando un plano, un "abanico", con lo que se persigue el efecto de conjunto en la interrelación entre los diferentes taladros.

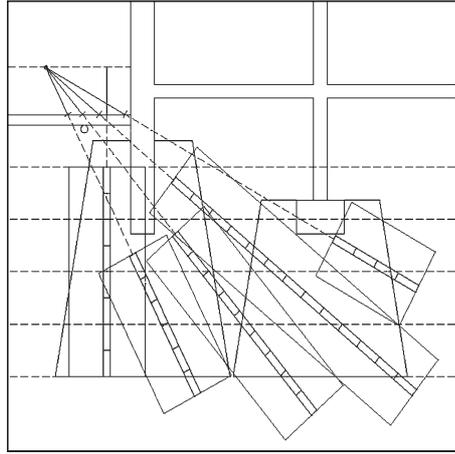


Figura 6. Barrena perforando (izda.), mismo proceso que para otras técnicas. Esquema de abanico más complejo, con diversas inclinaciones (derecha) (cortesía de CDE Arquitectura).



Figura 7. Abanicos de taladros ejecutados desde el exterior del edificio, dispuesto con taladros de diversas inclinaciones (cortesía de CDE Arquitectura).

Los taladros pueden disponerse con diversas inclinaciones, incluso subhorizontales, (figuras 6 y 7) o con pendientes negativas. Esto permite el planteamiento de ejecución desde planos inferiores a la cota superior del prisma a tratar.

En los casos que el prisma a tratar se ubique a distancia del punto de acometida, los tramos de acceso hasta el prisma se realizan con tubo liso, sin preparación de manguitos.

Complementariamente, los bulones, que en definitiva constituyen los tubos de inyección, y cuya capacidad mecánica se puede reforzar en los casos precisos por introducción final de un redondo de acero en el interior del tubo, sirven de elementos de cosido de las superficies potenciales de deslizamiento del terreno bajo las cargas que lo solicitan, lo que mejora el comportamiento mecánico del suelo tratado.

La transmisión de la carga, desde la cimentación al terreno no necesita ningún elemento intermedio de conexión, se produce del mismo modo inicial, mediante el contacto directo de la cimentación a recalzar, y el terreno ya tratado, no modificando la forma de trabajar inicial del edificio, aspecto fundamental en el campo de la intervención en

edificación, en algunos casos puede permitir la regeneración de estructuras dañadas por agresiones del terreno recomponiéndolas y conectando más eficientemente con el terreno de apoyo.

La puesta en carga es progresiva conforme se va produciendo la mejora del terreno y su aumento de cohesión, y por tanto no implica variaciones bruscas en el comportamiento estructural de la edificación existente.

Esta progresividad en la ejecución permite incluso la ejecución de recalces parciales, mediante la utilización de zonas de transición entre la zona recalzada y la parte sin recalzar con tratamientos de menor grado que impidan la creación de «puntos duros», los que, en caso de existir, producirían deterioros en las zonas de transición.

Las presiones de tratamiento se ajustan en general a patrones sancionados por la práctica y recogidos en la literatura técnica. En Europa se acepta habitualmente incrementar la presión de tratamiento en 1 kg/cm^2 por cada metro de aumento de la profundidad. Según la experiencia este aumento lineal puede conducir a heterogeneidades de la zona tratada, especialmente en la zona de contacto con la cimentación donde se con-

centran las cargas. Por este motivo se uniformizan más las presiones, incrementándolas en zona superficial y reduciéndolas algo en zona profunda, de modo que se «precargue» el terreno en forma más uniforme.

En caso de considerarlo oportuno, una vez tratados los tubos de inyección, se pueden dejar limpios interiormente, y abiertos por sí, durante el control de movimientos y desplazamiento medidos durante la fase de vaciado fuera necesario algún refuerzo parcial del tratamiento, lo que siempre sería factible a través de cualquiera de los manguitos de cualquier tubo. A estos efectos se puede dejar también un equipo de retén en la obra, si bien hasta la fecha no se tiene conocimiento de haber sido necesario aplicar esta precaución.

Esto es indicativo de que el mayor control (realmente autocontrol del sistema) se produce a través de las fases de inyección de cada manguito y de su presión final de tratamiento que quedan recogidos completamente e incluso expuestos gráficamente en obra a partir de cada uno de los partes individualizados.

Se ha de tener en cuenta que la distribución espacial de los tubos de manguitos y de sus válvulas de tratamiento permite que el dominio o “sólido a tratar” quede afectado por un número muy elevado de puntos de inyección, por lo que el control del tratamiento producido por las propias fases de inyección es muy “fino”, y cualquier anomalía del terreno queda al descubierto a través de la evolución de la inyección de los manguitos más próximos a dicha anomalía.

Asimismo al quedar perfectamente accesible el interior de los tubos de manguitos, una vez efectuado el tratamiento resulta factible su refuerzo final, frente a su comportamiento de bulón o tirante, mediante la inclusión y sellado al tubo de un redondo de armado de 32 ó 45 mm de diámetro.

En el apartado siguiente se expone el método de cálculo que se puede utilizar para determinar los parámetros geotécnicos que se obtienen en el terreno una vez tratado, aportando un sistema válido de cálculo, contradiciendo, la “mala prensa” que refiere la ausencia de métodos de cálculo analítico para conocer la eficacia o diseño de los tratamientos mediante la inyección armada.

5. ESTIMACIÓN DE PARÁMETROS MECÁNICOS DEL TERRENO TRATADO POR LA INYECCIÓN

Según recoge el diagrama de Mohr, si se supone en el terreno un estado tensional σ'_h, σ'_v (presiones efectivas horizontal y vertical, respectivamente), la condición de rotura, para una presión hidrostática, p , ocurriría cuando el círculo de tensiones, trasladado $-p$, fuera tangente a la envolvente de resistencia, que se supone corresponde a parámetros efectivos de cohesión, c' , y de ángulo de fricción interna ϕ' .

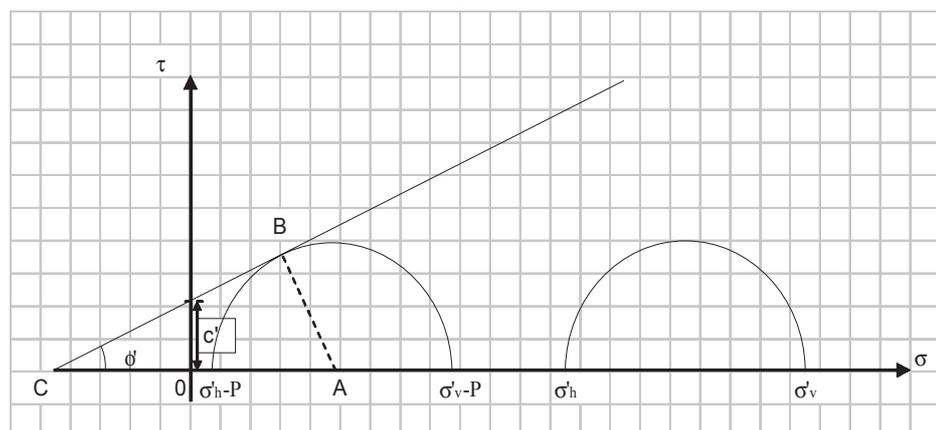
De la condición de tangencia del círculo trasladado se deduce:

$$AB = AC \text{ sen } \phi$$

Por tanto:

$$AB = \frac{\sigma'_v - p - \sigma'_h + p}{2} = \frac{\sigma'_v - \sigma'_h}{2}$$

$$AC = OC + OA = \frac{C'}{\text{tg } \phi'} + \frac{\sigma'_h - p - \sigma'_v - p}{2}$$



En consecuencia:

$$\left(\frac{C'}{\operatorname{tg} \phi'} + \frac{\sigma'_h + \sigma'_v - 2p}{2} \right) \operatorname{sen} \phi' = \frac{\sigma'_v - \sigma'_h}{2}$$

$$C' \cos \phi' + \frac{\sigma'_h + \sigma'_v}{2} \operatorname{sen} \phi' - \frac{\sigma'_h - \sigma'_v}{2} = p \operatorname{sen} \phi'$$

A efectos de simplificar la estimación, considerando que el estado tensional del terreno está muy alejado del estado de plastificación, puede suponerse:

$$\sigma'_h \simeq \sigma'_v$$

Resultaría así:

$$C' \cos \phi' + \sigma'_v \operatorname{sen} \phi' = p \operatorname{sen} \phi'$$

y dividiendo por $\cos \phi'$ ambos miembros

$$C' = (p - \sigma'_v) \operatorname{tg} \phi'$$

De este modo, y simplificando los fenómenos tensionales en el suelo, se obtiene una relación directa entre la presión residual, tras el proceso de inyección, obtenida directamente en el manómetro de boca de taladro, y los parámetros geotécnicos del terreno, de tal modo que conociendo la primera se puede conocer el estado real del terreno tratado (tanto durante la fase de ejecución como al finalizar el tratamiento).

Duncan y Buchignani (1976) (6) proponen como estimación conservadora del módulo de deformación $E > 400 S_u$, y como estimación de la deformabilidad del terreno tratado puede aceptarse, como es norma en cuantas aplicaciones de este tratamiento se han llevado a cabo para ejecución de vaciados rasantes con medianeras construidas en mal estado mecánico de conservación o pertenecientes a edificios de interés histórico o artístico, que, a raíz de ejecutar vaciados incluso de profundidad equivalente a más de cuatro o cinco sótanos, no se hayan detectado asentamientos medibles, habiendo resultado no afectadas visiblemente ninguna de las medianerías construidas.

6. RESULTADOS DE PRUEBAS SOBRE EL TRATAMIENTO APLICADO A LA MEJORA DEL TERRENO

Todo lo expuesto hasta el momento no se basa en una mera cuestión de teoría, de cálculo, o práctica de la aplicación de un sistema. Se han realizado diferentes pruebas, ensayos y seguimiento de obras ejecutadas, dirigidas por organismos oficiales, que han controlado sus resultados. Algunos de ellos se refieren brevemente a continuación.

En el Simposio Europeo organizado en junio del año 2000, por la Sociedad Finlandesa de Geotecnia y referido a Técnicas de mejora del terreno (Grouting Soiling Improvement. Geosystems including reinforcement) se presentó una comunicación de la que son autores Santos y Cuellar (7), del laboratorio de geotecnia del CEDEX en la cual se hacía referencia a una marga arcillosa que se trató mediante la técnica de inyecciones armadas.

Este terreno de plasticidad media alta, tenía inicialmente consistencia suficiente para permitir la sollicitación, por parte de una zapata superficial (2x2x1,5 m), de una tensión de contacto uniformemente distribuida de 20 kg/cm², con un asiento máximo de 4,5 cm, en tanto que tras un tratamiento de la marga por inyecciones armadas con presión máxima de inyección de 7 kg/cm², el asiento de otra zapata superficial (2x2x1,5 m), bajo la misma tensión de 20 kg/cm², fue de tan sólo 3,4 mm. Lo que implica una décima parte y una mejora sustancial en lo referente a la deformabilidad del suelo tratado.

En el libro editado como homenaje al Profesor Jiménez Salas (Geotecnia del año 2000) se incluye un texto referente a esta técnica de inyecciones armadas a la que se denomina como "Sistema de mejora prefijada del

terreno compatible con movimientos milimétricos del entorno (8), en dicho texto se recogen las vistas de un terreno tratado bajo un edificio singular de principios del siglo XX, que sirvió como cimbra de la construcción existente, toda vez que la excavación se realizó según representan las figuras prácticamente a plomo con ambas caras del muro de carga, de ladrillo, que se conservaba, ejecutando la estructura de sótanos y su cimentación, de abajo hacia arriba abriendo en terreno tratado los alojamientos de los sucesivos cuerpos estructurales subyacentes (9).

Como es lógico este tipo de tratamientos del terreno se ha desarrollado en suelos de la más variada textura (desde arenas a arcillas y margas de alta plasticidad) lo cual es viable por realizarse a través de una fracturación hidráulica controlada y selectiva realizada con la introducción de mezclas estables a base de cemento como ya se ha indicado anteriormente.

7. LOS SISTEMAS DE CONTROL DE EFECTIVIDAD DEL TRATAMIENTO

La efectividad del tratamiento realizado en el terreno, mediante la técnica de inyecciones armadas con tubo manguito, está demostrada en los diferentes ensayos realizados de pruebas específicas para tal comprobación como son las realizadas por Organismos oficiales como el CEDEX, y que quedan plasmadas en bibliografía específica, donde se pueden observar las modificaciones resultantes en lo que se refiere a los módulos de deformación del terreno, así como en sus parámetros resistentes, algunos comentados en el apartado anterior.

Para la evaluación de los resultados del tratamiento realizado en el caso de existir indicios de su no efectividad, o en el caso de considerarlo necesario la Dirección Facultativa, se podría realizar un control sobre el módulo de deformación.

La mejor opción para la auscultación del estado final del terreno tratado es por medio de ensayos in situ estáticos (presiómetros y dilatómetros, además de la siempre posible prueba de carga) o dinámicos como son los ensayos Cross-Hole con las únicas condiciones de realizarlos con propagación de ondas perpendiculares a los planos de tubos manguito de modo que el acero de éstos no perturbe la medida de velocidad de ondas en el terreno y de aplicarlos a la medida de velocidades de ondas S (ondas de cortante) que no se ven afectadas por la posible presencia de agua freática en los niveles del terreno tratado, y como último térmi-

no la prueba de placa de carga. El módulo de deformación del suelo (E), que debe quedar, una vez realizado el tratamiento, será superior a 1.500 kg/cm².

Es de interés poder comparar los datos del terreno tratado con datos del terreno sin tratar (datos previos al tratamiento), si bien en el caso de tratarse de un suelo con cierta homogeneidad, podrían realizarse las pruebas en el entorno más próximo al terreno ya tratado (y sin afección del sistema ejecutado).

Los ensayos sobre testigos obtenidos en la realización de sondeos, son pruebas de carácter puntual, que pueden no ser efectivos para datar correctamente los resultados geotécnicos finales ya que al tratarse de un tratamiento mediante la inclusión de lenguas de lechada, provoca la obtención de un testigo con inclusiones, que al no ser ni isotrópico, ni homogéneo y con las inclusiones datadas, no se presta al ensayo de cualquier muestra inalterada (a tal efecto y para minimizar tales cuestiones, el tamaño del testigo debería ser de mayor tamaño, aspecto poco práctico y de difícil ejecución).

Si bien en caso de realizarse este tipo de ensayos siempre serían datos de carácter complementario a los ensayos anteriormente referidos (geofísicos), teniendo la posibilidad de ser comparados con muestras anteriores, siempre que las muestras se tomarán de forma muy próxima a las originales. Esto mismo ocurre con las pruebas de penetración, ya sean dinámicas o estáticas

8. AUSCULTACIÓN Y CONTROL DE MOVIMIENTOS

La posibilidad de movimientos es estructuras propias (caso de recalce), o del entorno, es una realidad, que depende del estado y proceso de degradación de los elementos afectados, así como del propio terreno a tratar.

Los movimientos en los edificios sobre los que se actúa, se pueden producir en la fase de perforación (en el caso de relajación del suelo, hundimiento de las paredes de perforación por no tener consistencia,...).

También se pueden producir en la fase de inyección, por reblandecimiento del terreno, por un exceso de presión (en función de la respuesta según el tipo de suelo que se trate, y si no se sigue el procedimiento de ejecución adecuado en tiempos y caudales).

Esta posible producción de movimientos implica la necesidad de realizar un adecuado control de los mismos. Durante el tratamiento de inyecciones armadas se efectúa siempre un control muy cuidadoso de asentamientos en la zona tratada y en zonas adyacentes, instalándose regletas con división en milímetros, que se fijan adecuadamente a los soportes (pilares y muros), y se nivelan antes, durante y después del tratamiento (figura 8).

Las nivelaciones se deben diferenciar en al menos dos tipos, la primera la que se realiza sobre cada uno de los puntos en el que se procede a inyectar, con una limitación prefijada de movimiento, que implique la paralización de las operaciones si se supera tal límite.

El segundo tipo de medida es el control altimétrico general y periódico del edificio, y elementos del entorno, para conocer la evolución de los movimientos globales del edificio, más en los casos en los que ésta es la causa de la intervención.

En los casos controlados, en los que el movimiento inicial es del orden de varios milímetros anuales, caso de varios edificios de Santa Eugenia en Madrid (Obras diseñadas y dirigidas por CDE Arquitectura, ejecutadas por CIMTRA, y controladas por un equipo del Departamento de Arquitectura de la Universidad de Alcalá), se ha controlado la reducción de los movimientos durante el proceso de tratamiento, con una recuperación del estado inicial del edificio, para obtener una paralización total del movimiento a la finalización de éste, con controles de una duración de dos años y medio.

En el caso en que se haya de realizar un vaciado, se estima aconsejable, una vez

concluido el tratamiento y antes de iniciar la excavación, la instalación de tubos inclinómetros distribuidos en torno al perímetro a vaciar para el seguimiento de movimientos horizontales simultáneos o posteriores a la realización de dicho vaciado. Estos sistemas se han dispuesto en diversas aplicaciones, proporcionando en todos los casos movimientos del orden de la precisión del dispositivo de medida.

9. LAS APLICACIONES EN LA EDIFICACIÓN ACTUAL

La mejora del terreno mediante inyecciones armadas permite ejecutar diferentes aplicaciones, desde las relacionadas con su origen en la obra civil, impermeabilizaciones, consolidación y sellado de zonas de apoyo en presas, en túneles, en carreteras,... hasta su aplicación en la edificación, objeto de este trabajo.

En este aspecto, en la edificación, el primero de los campos donde se aplica es el recalce de cimentaciones existentes, mejorando el terreno hasta el nivel considerado, sin necesidad de establecer una conexión estructural entre cimentación defectuosa y elementos de recalce, por ello se puede efectuar el recalce desde el exterior de las construcciones, sin que afecte a la funcionalidad de las mismas, y especialmente manteniendo la ocupación de los edificios en tratamiento. Siendo de gran aplicación en construcciones antiguas de las más variadas fábricas.

La combinación de inyecciones del terreno y cosido del mismo mediante elementos resistentes a tracción permite resolver problemas complejos, tanto de estabilidad del terreno en laderas como de recalce de elementos estructurales, situados en estas



Figura 8. Equipos de control altimétrico. Nivel y regleta de control (cortesía de CIMTRA).

zonas, y sujetos a limitaciones muy estrictas de movimiento, tanto en dirección vertical como en dirección horizontal.

Sin embargo hay otros tipos de aplicaciones de este sistema en el campo de la edificación, y no directamente relacionados con aspectos patológicos, sino en obras de nueva planta. El primero de ellos, es el tratamiento para la ejecución de vaciados, sin elementos tradicionales de contención, con otras posibles aplicaciones relacionadas con la estabilización e impermeabilización de excavaciones y los vaciados en zonas urbanas.

El refuerzo de cimentaciones adyacentes a las zonas de trabajo es otra aplicación factible, no en vano en algunas ciudades norteamericanas es de obligada ejecución el recalce preventivo de los edificios del entorno. Además hay que tener en cuenta que el elevado coste del suelo urbano conduce a la necesidad de realizar excavaciones de funcionalidad muy diversa (túneles, sótanos, galerías,...) adyacentes a construcciones preexistentes de naturaleza y estado, asimismo, muy variados.

Así, haciendo un cuadro resumen de las posibles aplicaciones se obtendrían las siguientes:

A. Recalces de cimentaciones afectadas por procesos patológicos (figura 9).

- de edificaciones con carácter de Patrimonio Arquitectónico
- de edificaciones con carácter doméstico (incluso de reciente ejecución)

B. Estabilización de laderas ante deslizamientos

D. Estabilización del corte para vaciados (figuras 10 y 11).

E. Tratamientos de fondo para vaciados para impermeabilizar (figura 12).

F. Mejoras de terreno para sustitución de cimentación profunda por superficial (figura 13).

G. Mejora de terreno en estructuras lineales.

- Cimentaciones de elementos puntuales
- Mejora de zonas de transición
- Recalce de cimentaciones puntuales

10. VENTAJAS DE LA ADOPCIÓN DEL TRATAMIENTO DE INYECCIONES ARMADAS

Con la aplicación del tratamiento se obtienen una serie de ventajas, que serían por un lado, un prisma de terreno con propiedades mecánicas mejoradas desde la cota considerada, con un menor grado de permeabilidad, reduciendo (y anulando) los esfuerzos de empuje lateral del terreno en el caso de vaciados, permitiendo un corte vertical y enrasado con los límites de la parcela (con lo que se gana una cantidad significativa de superficie libre en la parcela en las plantas bajo rasante), recalzando de forma adecuada las cimentaciones de los elementos propios o ajenos (en el caso de edificaciones medianeras construidas) que se desean mantener, y evitando afecciones (como hundimientos) de la zona de vial o acerado en el proceso de excavación.

A su vez se facilita el proceso de excavación, al poder realizarse en una sola operación en todo el solar, sin planteamiento de colocación de elementos de arriostamiento, ni de alternancias, como se producen en el caso de la excavación por bataches.

Asimismo para la ejecución de vaciados, la aplicación de las inyecciones armadas, per-



Figura 9. Recalce de la Colegiata de Belmonte (izqda., cortesía de CIMTRA) y recalce edificio de Viviendas en Madrid (derecha, cortesía de CDE Arquitectura).





Figura 10. Vaciado para Parking en Sevilla. Detalle de la independencia del muro de cerramiento respecto al corte ejecutado (cortesía de CIMTRA).

mite la excavación enrasada con los límites de la parcela, y al ser un tratamiento que al consolidar de forma estable el terreno en el tiempo, no necesita la colocación de ningún elemento de contención, pues, como se ha indicado, el tratamiento se dimensiona para soportar el empuje al reposo del terreno circundante al vaciado. Por tanto, la estructura portante del edificio se independiza totalmente de las estructuras de contención utilizadas en los sistemas tradicionales.

El cerramiento, por un aspecto estético de no dejar el corte visto, podría consistir simplemente en una superficie de recepción del acabado final que se quiera dar, se conocen soluciones realizadas mediante un tabique (de ladrillo hueco sencillo), hasta la colocación de paneles prefabricados de cerramiento. Esto implica una ampliación de la superficie de parcela utilizable en plantas inferior



Figura 11. Vaciado para sótano en arenas (cortesía de CIMTRA).



Figura 12. Tratamientos realizados para vaciado de dos sótanos en espigón en Gijón, bajo nivel de marea. Impermeabilización del vaso. (Cortesía de CIMTRA)



Figura 13. Abanico dispuesto como sistema de apoyo de una cimentación de obra nueva (cortesía de CIMTRA).

res (sótanos), en comparación con las soluciones tradicionales de pantalla, que, en la gran mayoría de los casos, hay que revestir de algún modo.

Asimismo indicar que el coste de este tipo de tratamiento se puede estimar con carácter previo a su ejecución, con la estimación de los volúmenes de inyección, lo que permite realizar una estimación de su coste, incluso llegando a cerrar el precio por metro lineal de tratamiento. Las experiencias ana-

lizadas han constatado, que salvo errores en los estudios geotécnicos base de las propuestas técnicas, las desviaciones presupuestarias no superan, en ningún caso, el 10%, siendo, en muchas ocasiones, a la baja en la misma proporción.

11. CONCLUSIÓN

Como se ha observado, y dada la gran variedad de circunstancias que pueden presentarse a la hora de plantear el sistema a utilizar en las unidades de obra bajo rasante, tanto en los procesos de rehabilitación como de obra nueva, no se pueden presentar soluciones generales, ni catálogo de soluciones sistemáticas, siendo de gran importancia la metodología aplicada en el análisis de la problemática, que lleven tanto a un diagnóstico completo del problema a solucionar como a la técnica concreta de aplicación.

Para poder seleccionar, diseñar y poner en marcha cualquier solución es necesaria la preparación científica y técnica adecuadas, por parte de los técnicos que intervienen en este tipo de actuaciones, de tal manera que se prevean las acciones derivadas del tipo de solución aplicada, y no se condicionen las obras a decisiones provenientes de otros sectores con otro tipo de prioridades (económicas, espaciales, ...), de tal modo que se adopten las medidas de cautela específicas, cuyo olvido puede dar lugar a fracasos o a imprevistos de carácter importante.

Asimismo es necesario encomendar la intervención a Empresas especializadas, con gran experiencia en el tipo de sistema a aplicar, de manera que estén en condiciones de realizar la actuación, prever los posibles problemas que puedan aparecer, e incluso puedan proponer soluciones alternativas o complementarias idóneas al problema a tratar, siempre de forma coordinada con los técnicos referidos en el párrafo anterior.

Además de todo lo expuesto, hay que incidir, que en este tipo de actuaciones es de

gran importancia la visión interdisciplinar, ya que es necesario tener en cuenta y comprender opiniones desde los diferentes puntos de vista que intervienen según los casos (el arquitecto, el ingeniero, el arqueólogo, el historiador, los oficios artesanos,...).

La Universidad de Alcalá tiene una gran preocupación sobre la intervención en el Patrimonio (no en vano ella misma es Patrimonio de la Humanidad), y dentro de ello una de sus misiones está centrada en la investigación, actualmente y desde el Departamento de Arquitectura, concretamente el Área de Construcciones Arquitectónicas, sobre diversas técnicas de aplicación en las intervenciones en el Patrimonio Arquitectónico.

Con el objeto de profundizar en el conocimiento y la difusión del sistema de las inyecciones armadas, actualmente se está desarrollando un Proyecto de Investigación junto con la Empresa CIMTRA (Cimentaciones y Tratamientos S.A.), a través del cual se están analizando numerosas intervenciones en diversos tipos de suelo, con circunstancias específicas, al efecto de conocer el comportamiento y evolución de esta técnica, así como las afecciones que se pudieran producir en los edificios, según su sintomatología.

Se ha desarrollado, dentro de este trabajo, un sistema de control durante la propia ejecución de la obra, que permite el seguimiento, la detección de problemas, y la adopción de medidas correctoras, prácticamente de forma inmediata.

La segunda parte del proyecto, en ejecución actual, versa sobre los diferentes sistemas de control de la eficacia del tratamiento en suelos de carácter complejo.

Uno de los objetivos principales de esta colaboración, está en la difusión de los resultados que se van obteniendo, de tal modo que permitan un mayor acercamiento profesional a ésta, u otras técnicas de intervención bajo rasante.

BIBLIOGRAFÍA

- (1) Vitrubio (traducido por Carmen Andréu) (1972) "Los diez libros de Arquitectura, Libro III", cap III. Ed. Unión Explosivos Riotinto, Madrid.
- (2) José Antonio Jiménez Salas (1980), "Geotecnia y cimientos III". Cap 8, pág. 954-955. Ed Rueda, Madrid.
- (3) Joaquín Canalda Contreras y José Luis Fernández Salso (1998) "Tratado de Rehabilitación", cap. 2. pág. 55. Ed Munilla Lería, Madrid.
- (4) León Bautista Alberti (1582) "Los diez libros de la Arquitectura", Libro III", cap II, traducido por Francisco Lozano, Alonso Gómez, Madrid.
- (5) Fernando Ripollés (1999) "Manual de Construcción". Cap. 8. Ed Munilla-Lería. Madrid.
- (6) Duncan, J.M. & Buchignani, A.L. (1976), "An Engineering manual for settlement studies". *Geotechnical Engineering Report*, University of California, Berkeley. USA.

- (7) Santos, A & Cuellar, V. "Mechanical improvement of an argillaceous marl through cement-based reinforced grouting" *Grouting Soil Improvement. Geosystems Including Reinforcement*. Hans Rathmayer ed., Finnish Geotechnical Society. Helsinki 2000.
- (8) Santos, A., Garrido, C. et al. "Sistema de mejora prefijada del terreno compatible con movimientos milimétricos del entorno" *Libro homenaje a José Antonio Jiménez Salas*. AA.VV. Ed. Mº Fomento. Madrid, 2000.
- (9) Garrido, J. "La técnica de inyecciones armadas aplicada a la ejecución de sótanos bajo edificaciones existentes". *Ingeniería del Terreno (Ingeoter) Tomo 4º. Capítulo 17*. ed. U.D. Proyectos - ETSI Minas. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid, 2004.
- (10) Da Casa, F., Echeverría, E. & Celis, F. (2001) "Los recalces de cimentación. Una técnica de intervención específica". *Revista dda Nº 4*. Ed. Munilla-Leria. Madrid.
- (11) Cuellar, V. (2004) "Inyecciones por fracturación e inyecciones de impregnación". *4ª Jornadas Técnicas SEMSIG-AETESS*, Febrero 2004, Ed. CEDEX. Madrid.
- (12) AA.VV. (1994) «Recalces en la rehabilitación de edificios». *Apuntes curso. Comisión tecnológica COAATM*, Madrid.
- (13) Da Casa, F. (2004) "La inyección Armada técnica específica para el Recalce de cimentaciones específico en el Patrimonio Arquitectónico" *ponencias de las Jornadas sobre Geología y Geotecnia del Patrimonio Histórico. Jornada 1ª: Edificios Históricos* Ed. AEGAIN, Madrid.
- (14) Da Casa, F., Echeverría, E. & Celis, F. (2005) "El recalce de cimentaciones en el Patrimonio Arquitectónico" *Revista VIVIENDA, la revista de la construcción*. Buenos Aires, Argentina.
- (15) Da Casa, F., Echeverría, E. & Celis, F. (2005) "Tratamiento perimetral con inyecciones armadas para excavación para parking subterráneo en Sevilla." *Libro de actas de las "2ª Jornadas Luso-Espanholas de Geotecnia*. Ed. Sociedad Portuguesa de Geotecnia. Lisboa, Portugal.
- (16) Santos, A., & Da Casa, F. (2005) "Inestabilidad en un macizo rocoso en ámbito urbano: el Parador Nacional de Turismo de Carmona (Sevilla)." *Libro de actas del VI Simposio Nacional sobre Taludes y Laderas Inestables*. Ed. Universidad Politécnica de Valencia y Universidad Politécnica de Catalunya, Valencia.
