

La Tomografía de la resistividad eléctrica en consolidaciones con resinas expansivas

La búsqueda y empleo de ensayos diagnósticos que ayuden a la determinación de un problema de asentamiento de una determinada estructura así como las pruebas de seguimiento y control están muchas veces condicionados, casi exclusivamente, por elementos económicos y precisamente por eso tanto técnicos como clientes deciden no realizar estudios más adecuados con la posibilidad que más adelante el daño que esto pueda causar comporte un mayor gasto del que se quiso evitar en un primer momento. En este artículo se expone la tomografía eléctrica como un método que proporciona información precisa acerca de las causas de los asentamientos y permite el control y verificación de procesos derivados de la inyección como el relleno de cavidades o alejamiento del agua desplazados por la expansión de la resina hacia puntos de menor energía.

Un sistema convencional, que tenga en cuenta las *Normativas Técnicas* del sector de la Construcción, tiene que considerar la realización de un estudio preliminar orientado a identificar las causas y consecuencias en relación a las condiciones del entorno. Esto hace que sean imprescindibles la elección y el empleo de instrumentos para medir aquellos parámetros necesarios para solucionar el problema inicial aconsejando una referencia que soporte el proyecto y la verificación del mismo.

El empleo de la *tomografía de la resistividad eléctrica* como técnica de investigación poco invasiva de última generación, (*ERT*, del nombre inglés *Electrical Resistivity Tomography*), en el proyecto y seguimiento de una obra de recalce mediante la consolidación de terrenos de cimentación con inyecciones de resinas de lenta expansión, se presenta como herramienta fundamental, como veremos más adelante. Permite definir en tres dimensiones (*ERT 3-D*), la distribución de la resistividad eléctrica en el subsuelo, incluso bajo el mismo edificio donde en la mayoría de los casos los estudios geotécnicos habituales no pueden llegar (sondeos mecánicos, pruebas penetrométricas). Observando esta distribución se podrá obtener el modelo geológico local del área circunscrita a la estructura asentada. De esta forma, la técnica *ERT* extiende a la totalidad del subsuelo estudiado la información que los estudios geotécnicos han facilitado permitiendo establecer las causas del asentamiento.

En una segunda fase, mediante la continua repetición del estudio *ERT (ERT 4-D)*, aprovechando el contraste de resistividad eléctrica entre las porciones de terreno tratadas con resina y no tratadas, se pueden evaluar los efectos inducidos en el terreno y, en función de estos, llevar a cabo eventuales modificaciones en la distribución de los puntos de inyección.

Una vez finalizada la intervención el *ERT* permite entender si la causa del asentamiento ha sido eliminada de forma definitiva: por ejemplo si el asentamiento ha sido causado por el agua, ver si esta ha sido alejada gracias a la in-

Palabras clave: ASENTAMIENTO, CIMENTACIÓN, CONSOLIDACIÓN, INYECCIÓN, MONITORIZACIÓN, RECALCE, RESINA EXPANSIVA, TOMOGRAFÍA ELÉCTRICA.



Dpto. Técnico de
GEOSEC ESPAÑA, S.L.

yección de resinas. La unión del estudio *ERT/4D* y de la técnica de consolidación mediante inyecciones de resinas expansivas, permite dirigir de manera eficaz la inyección misma, evitando concentrar el agua anómala bajo la cimentación del edificio.

Basándose en la experiencia adquirida, se ha intentado mejorar la técnica focalizando la atención en la determinación de sistemas diagnósticos y de proyecto que puedan tener en consideración, en una visión tridimensional, las tres fases de un terreno, no solo la sólida, sino también la fluida (agua) y la gaseosa (vacíos).

Resulta por lo tanto muy adecuada la unión del proceso de inyección y del sistema de monitorización *ERT-3D/4D*, que pueden definir, la presencia de cavidades y de agua intersticial en el terreno, que son las causas más comunes del asentamiento, y seguir su evolución. La tomografía de la resistividad eléctrica es útil para verificar en el terreno, en tres dimensiones, los efectos *cualitativos* de las inyecciones, es decir verificar si han sido colmatadas las cavidades y/o si ha sido alejada el agua intersticial presente en el terreno bajo la cimentación asentada.

Los ensayos penetrométricos posteriores al estudio *ERT-3D/4D* completan los ensayos diagnósticos estableciendo la resistencia mecánica del terreno objeto de intervención.

La intención es analizar las técnicas de prueba y de estudio del terreno afectado por asentamiento diferencial, en relación a las intervenciones que contemplan la inyección de resinas expansivas, aconsejando una referencia que soporte el proyecto y la verificación de estas modernas intervenciones de *consolidación del terreno*⁽¹⁾.

La monitorización

El comportamiento de la resina como agente externo que interacciona con el terreno depende tanto de las cargas ejercidas por la cimentación como de las características del volumen de subsuelo implicado.

En el campo de las intervenciones de consolidaciones de terreno el técnico se enfrenta habitualmente con una multitud de materiales heterogéneos presentes en la naturaleza y, por muy amplia que sea la gama de muestras recogidas o los estudios *in situ* realizados, nunca se tendrá la certeza de que la representación de la variedad de características de un terreno sea exhaustiva. De hecho, contrariamente a un normal proyecto de ingeniería (estructuras, instalaciones etc.) el proyecto geológico-técnico se basa en la elección, por parte del profesional, de los valores más probables entre todos los posibles.

El objetivo de los estudios *in situ* es identificar, en la medida de lo posible, un modelo simplificado de la realidad física pasando por unos procedimientos y unos métodos de proyección que permitan llegar a una solución fiable del problema.

Durante la intervención con esta técnica de recalce se monitorizan los parámetros más significativos y se observa el comportamiento de la obra en función del modelo de proyecto empleado, modificando si fuera necesario la decisión inicial tomada. La monitorización, es por tanto, parte del proceso de ejecución y los instrumentos utilizados constituyen el medio más adecuado para la observación y evaluación. En el campo de las intervenciones, cuya finalidad es contrarrestar los *asentamientos* *dí-*

(1) *Consolidación del terreno.-*

Aumento de resistencia del terreno que demuestra ser insuficiente mediante un conjunto de procesos por los cuales el terreno sufre modificaciones físico-químicas. La mejora de características geotécnicas como aumento de compresibilidad, resistencia al corte y disminución de permeabilidad son algunas de ellas.

ferenciales⁽²⁾ del terreno, son muchas las herramientas utilizadas por el jefe de obra: empezando por los instrumentos destinados a la adquisición del cuadro de lesiones de la estructura asentada, pasando a los instrumentos geotécnicos para la adquisición de los parámetros mecánicos del terreno y terminando con los instrumentos geofísicos, en particular aquellos utilizados para definir un modelo tridimensional que proporcione una información fiable acerca de la distribución de las litologías, de las cavidades, de las estructuras enterradas, de los flujos/concentraciones de agua en el subsuelo y de la variación en el tiempo de estas propiedades durante la acción de las resinas expansivas.

Las pruebas mecánicas

Son muchas las pruebas mecánicas del terreno que sustentan las intervenciones de consolidación mediante la inyección de resinas expansivas, y entre las más utilizadas se encuentran las pruebas penetrométricas estáticas y las *dinámicas*. Entre las *dinámicas* se pueden mencionar el *Standard Penetration Test (SPT)*⁽³⁾ con el cual se determina el número de golpes (N_{spt}) necesarios para insertar, hasta alcanzar una profundidad establecida, un tubo o una punta cerrada de medidas estándar dejando caer una masa predefinida desde una altura preestablecida. Se debería de realizar la prueba *SPT* en perforaciones especiales, pero a veces éstas resultan ser las mismas perforaciones utilizadas para otros sondeos geotécnicos. Las *Dynamic Probing (DP)* son pruebas penetrométricas dinámicas continuas que no necesitan perforaciones y por eso resultan más económicas y más sencillas. Se dividen en cuatro categorías, según el peso de la masa batiente M (clasificación ISSMFE 1988, *Tabla I*).

Estas pruebas se realizan preferentemente en terrenos granulares (arena, grava) pero, con precaución, se pueden realizar en cualquier terreno, también en presencia de rocas débi-

TIPO	SIGLA	PESO MAZA	PROFUNDIDAD MÁXIMA
Ligero	DPL	$M \leq 10$ kg	8 m
Medio	DPM	$10 \text{ kg} < M < 40$ kg	20 - 25 m
Pesado	DPH	$40 \text{ kg} \leq M < 60$ kg	25 m
Super Pesado	DPSH	$M \geq 60$ kg	25 m

[TABLA I]. - Categorías de las pruebas DP en función de la masa M (ISSMFE 1988).

les; en cambio, en caso de rocas muy grandes (bloques), esta tipología de prueba pierde su significado. Gracias a estudios empíricos es posible calcular de manera precisa:

- La densidad relativa (DR).
- El ángulo de resistencia al corte (ϕ).
- La resistencia a la licuefacción (τ_r/σ'_{vo}) de los terrenos granulares.
- El módulo de corte a pequeñas deformaciones (G_0).
- la resistencia al corte no drenado c_u en terrenos de grano fino.

La *DP* sigue siendo una prueba puntual y limitada al entorno vertical del área de estudio y en general sufre la influencia de las características de la herramienta utilizadas, de la forma de ejecución de la prueba y de la preparación profesional del operador.

En cambio, la prueba penetrométrica estática (*CPT - Cone Penetration Test*) consiste en la aplicación de un empuje vertical en el terreno ejerciendo presión sobre una punta cónica de medidas estándar y midiendo por separado, pero con continuidad, tanto el esfuerzo para penetrar como la adhesión por adherencia de un manguito puesto encima de la punta de penetración mientras esta avanza en el terreno.

La historia de estas pruebas se conoce a partir del 1917 cuando se realizaron durante las obras de construcción de la red del tren sueca. Sucesivamente, en 1934, la prueba ha sufrido importantes modificaciones hasta llegar a ser muy parecida a la que se utiliza hoy en día. La *CPT* puede proporcionar datos mucho más fiables acerca de la estratigrafía de los terrenos estudiados, en particular si se junta a sondeos como por ejemplo la extracción de muestras o las excavaciones *in situ*.

Además, los resultados de esta prueba son útiles a la hora de determinar algunas propiedades mecánicas del terreno estudiado, como por ejemplo la *resistencia* y la *capacidad de deformación* de terrenos que, por lo general, están compuestos por finos y arenas. Si además la prueba se junta al piezometro (*CPTU*), los resultados adquieren mayor precisión y se enriquecen de información acerca de la presión hidrostática de la eventual agua subterrá-

nea presente en el terreno o de las características de consolidación y de permeabilidad de los terrenos cohesivos saturados. En general, todas las pruebas penetrométricas proporcionan información a lo largo de la vertical del punto de terreno objeto de estudio, perdiendo precisión cuando se alejan de dicho punto a causa de la conocida heterogeneidad, sobre todo, de los terrenos superficiales.

Por esta razón hay que establecer diferentes pruebas oportunamente distribuidas en el terreno a estudiar y/o a consolidar.

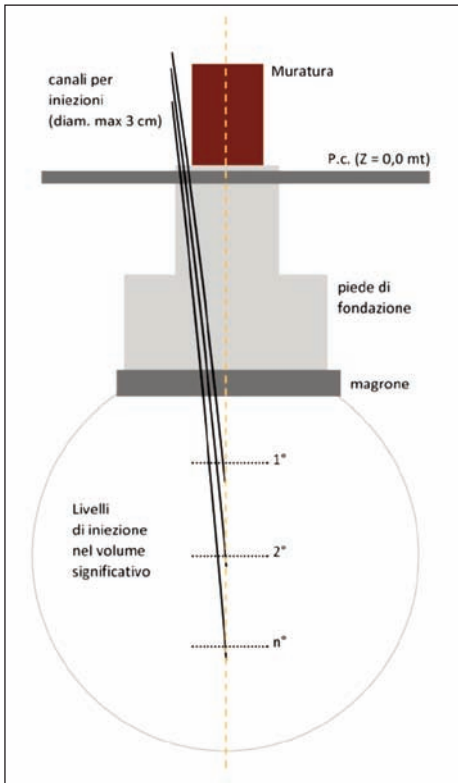
Sin embargo, permanece una dificultad de interpretación, en lo que concierne las pruebas penetrométricas, sobre todo en la verificación de las características tensodeformacionales y en la verificación de la resistencia de los terrenos. En particular *Jamiolkovski* (1988), evidenció algunas que considera causa de posible incertidumbre por parte del geólogo:

- 1) Excluyendo las pruebas de presión y algunas pruebas geofísicas, todas las demás presentan complejos problemas de interpretación teórica de las condiciones del entorno, porque están limitadas al solo entorno de la vertical de estudio.
- 2) Las condiciones de drenaje durante las pruebas *in situ* son escasamente controlables y en la mayoría de los casos presentan, para el técnico, una dificultad concreta a la hora de establecer si los resultados obtenidos se refieren a condiciones de drenaje total, parcial o de ausencia de drenaje. Este problema se verifica en las intervenciones con resinas, donde el producto inyectado comprime la litología según su fuerza mecánica de expansión, en función de la velocidad de reacción de la resina (de pocos segundos a varios minutos), mientras los tiempos necesarios para la consolidación de terrenos pueden resultar mucho más largos (días, meses, años). Muchas veces un terreno bajo presión mecánica manifiesta esfuerzos eficaces muy diferentes respecto a los estándares de la Ingeniería civil y esto puede generar dificultades de interpretación de los valores esfuerzo/deformación a causa de la marcada heterogeneidad de los terrenos mismos que presentan un comportamiento no lineal.
- 3) Contrariamente al pensamiento común todavía existe una dosis elevada de empirismo y de simplificación en lo que concierne la interpretación de los datos obtenidos.
- 4) Se evidencian además limitaciones a nivel operativo en la ejecución de la prueba. En el caso de intervenciones de consolidación mediante inyecciones de resina

(2) *Asentamiento diferencial*. - Cuando una estructura de cimentación asienta, su deformación puede depender de un asentamiento uniforme o de un asentamiento de tipo rotacional. Fijados dos puntos A y B de la deformación, la diferencia geométrica $ab = (b - a)$ de los relativos asentamientos medidos en A y B representa el asentamiento diferencial que causa una distorsión angular entre los mismos puntos ab . (WAHLS, 1981).

(3) *SPT (Standard Penetration Test)* . - Prueba en la que se mide el número de golpes necesarios para insertar una muestra estándar a la profundidad de 30 cm (1 pie), batiendo con una masa de 63,5 kg (140 libras) y con una altura de caída de 76 cm.

expansiva, se sabe que dichas inyecciones llegan bajo la huella de la cimentación asentada a través de camisas de inyección, colocadas de forma inclinada, que permiten atravesar la estructura de cimentación y llegar al terreno asentado en posición lo más centrada posible con respecto a la vertical (**Fig. 1**).

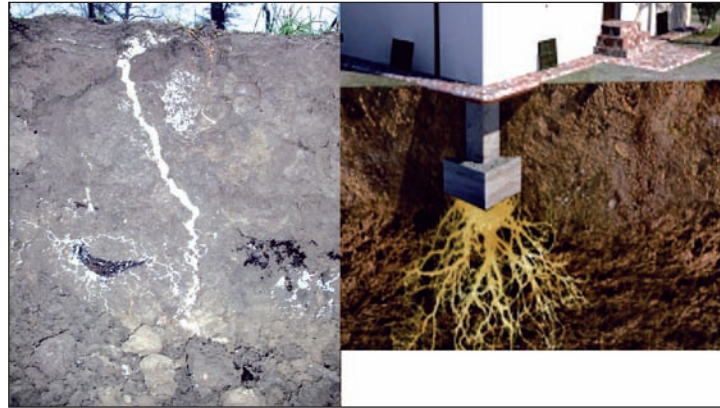


[Figura 1].- Geometría de la perforación para la disposición de camisas de inyección a diferentes niveles de profundidad (Geosec).

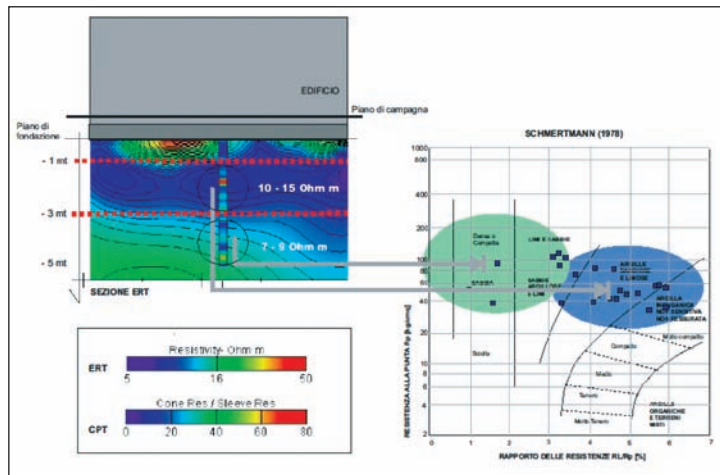
El uso de la consolidación mediante las inyecciones de resinas expansivas se estudia para la aplicación de las mismas en el bulbo de presiones⁽⁴⁾, el terreno que interactúa con el edificio, bajo la huella de cimentación. El uso de las pruebas penetrométricas llevaría de forma errónea a proceder con pruebas muy inclinadas al fin de llegar al volumen de terreno asentado/consolidado, sin considerar las estructuras portantes de cimentación colocadas en el interior del edificio, que no pueden ser alcanzadas por la prueba a menos que no se proceda a realizar demoliciones para aumentar la dimensión de acceso (**Fig. 2**).

Si a las pruebas penetrométricas se juntan/superponen a los análisis geoelectrónicos, podríamos definir un modelo, con consiguiente definición de la estratigrafía del terreno, en el que correlacionar los resultados de la prueba penetrométrica Estática y el Holograma geoe-

(4) *Bulbo de presión*.- Zona en un terreno cargado, delimitada por una isobara.



[Figura 2].- a) Reconstrucción de filamentos de resina inerte según una distribución a "raíz" en el volumen significativo, b) Sección de excavación con brazo liso en proximidad de una inyección superficial (Geosec, 2010).



[Figura 3].- a) Holograma de la resistividad eléctrica en el volumen implicado, b) mapa de clasificación del penetrómetro estático (Schmertmann 1978) y correlación local de los valores de resistividad y resistencia a la punta (Fischanger, 2008).



[Figura 4].- Muestra del volumen de terreno perteneciente a una zona consolidada mediante inyecciones de resina expansiva. En blanco los filamentos de resina poliuretánica inerte. (Occhi, 2010). Test Site Emilia Romagna.

léctrico del terreno. Una vez obtenidos los valores de resistencia a la punta R_p y de resistencia lateral RL se superpone a la imagen de la sección del ERT correspondiente a la vertical de la prueba (**Figs 3 y 4**).

Estudios geofísicos

En los últimos años la *Geofísica Aplicada* ha avanzado en la diagnóstico que sustenta la Ingeniería Civil, junto a la evolución de los instrumentos de medida, de los algoritmos de modelización, de los *software* de interpretación, de los calculadores electrónicos y la experiencia adquirida por los operadores.

El soporte diagnóstico de la *Geofísica Aplicada* se revela cada vez más eficaz (y suponiendo costes cada vez más accesibles) en determinadas situaciones:

- Cuando es necesaria una visión tridimensional del problema objeto de estudio, junto a una menor exigencia de invasividad y flexibilidad a la hora de operar.
- Cuando el contexto estudiado presenta una anisotropía marcada y una heterogeneidad de condiciones en el entorno.
- Cuando las dinámicas (flujos y/o concentraciones etc.) y las condiciones de los fluidos presentes en el terreno condicionan el contexto, objeto de intervención.
- Cuando es necesario un calibrado de las pruebas mecánicas.

Entonces, ¿Por qué la geofísica aplicada moderna, no obstante sea de vanguardia tecnológica, sigue siendo considerada con escepticismo por muchos técnicos?.

Hay diferentes respuestas a esta pregunta y se pueden resumir como sigue:

- a) Escaso conocimiento por parte del técnico de los métodos geofísicos y de sus fundamentos: a veces se consideran instrumentos y conocimientos complejos y no comunes propios de profesionales pertenecientes a sectores especializados.
- b) Desgraciadamente, no faltan los *aventu-*

meros improvisados. Hay que tener mucho cuidado y esto resulta difícil si el usuario no tiene los conocimientos suficientes.

- c) *Lógica de los costes*: el cliente exige el mejor resultado con el menor gasto posible, muchas veces sin tener los conocimientos suficientes para evaluar las propuestas y el nivel de profesionalidad ofrecidos, y sin tener en cuenta que un análisis más preciso del problema puede suponer un ahorro en el futuro, porque se realiza la verificación de cada intervención para evitar repeticiones o nuevas intervenciones reparadoras en el futuro.
- d) Estandarización de la diagnóstico para aquellos instrumentos que se consideran más conocidos y fáciles de utilizar y que resultan más controlables por parte de un potencial Jefe de Obra cuyos conocimientos se basan en parámetros exclusivamente geotécnicos. Muchos técnicos opinan que las pruebas mecánicas *in situ* son más fiables que los estudios geofísicos, olvidando que un estudio no tiene que ser mejor que otro, sino que tiene que ser más adecuado al análisis de un problema en concreto, y las pruebas necesitan ser comparadas entre ellas. El problema más grave es que se sigue teniendo conocimientos superficiales que no tienen en cuenta el aspecto diagnóstico del problema y el resultado es una estandarización empresarial del problema que aparentan ser más ventajosas, pero que con el tiempo resultan ser muy poco eficaces y resolutivas.
- e) Escasa actividad de información técnica: la *Geofísica aplicada* es una ciencia poco difundida en el sector de la Ingeniería Civil y quizás considerada apta sólo para problemas específicos como por ejemplo la búsqueda de petróleo y de materias primas, el cuidado ambiental, la arqueología, la actividad militar excluyendo los casos más comunes de intervenciones civiles ordinarias, en las que podrían resultar una ayuda fundamental para el geólogo a la hora de evaluar, proyectar y verificar las intervenciones.

Resulta indispensable operar con una actitud crítica y concreta basada en la profesionalidad de un técnico competente que:

- 1) Establezca y realice una diagnóstica preliminar adecuada del problema con el fin de identificar las causas del mismo.
- 2) Realice un proyecto personalizado de la intervención y defina los criterios de verificación.
- 3) Confíe en una empresa apta para ejecutar dicha intervención, que tenga experiencia, personal técnico cualificado, he-

rramientas propias, que de asistencia constante en la obra y que tenga los certificados de los procedimientos adoptados y de los materiales.

- 4) Realice las verificaciones de la intervención tanto durante la ejecución de la obra, como una vez finalizados los trabajos.

El asentamiento diferencial en las consolidaciones con resinas

Cuando se quiere solucionar un problema de *asentamiento diferencial* de tipo vertical mediante inyecciones de *resinas expansivas*⁽⁵⁾ bajo una estructura es necesario, en primer lugar, analizar unos aspectos fundamentales entre los cuales esta entender cuál es la causa del asentamiento diferencial.

Hay que evaluar en el sistema terreno/estructura donde y como ha empezado el asentamiento y si resulta ser la consecuencia de algunas variaciones/modificaciones realizadas en el edificio, como por ejemplo los niveles de carga añadidos o la nueva distribución de las cargas en la cimentación.

En alguno de estos casos el terreno bajo la construcción ya no resulta adecuado a la nueva geometría/entidad de carga de la cimentación. El problema, entonces, ya no se podrá asociar a defectos o anomalías propias del terreno (alteraciones antrópicas o naturales del suelo de cimentación) sino a las modificaciones estructurales realizadas que ya no se adaptan al antiguo sistema terreno/cimentación.

En estos casos es posible intervenir según un sistema más focalizado en la ingeniería y geotecnia, actuando sobre la estructura de cimentación (aumentando el ancho de la base de apoyo, reforzando el pie, transfiriendo las cargas a estratos de terreno más resistentes, etc.) o actuando directamente sobre el terreno de cimentación, sin tener en cuenta la estructura, con intervenciones que aumentan la capacidad de carga.

En este caso, las resinas expansivas pueden realizar una acción eficaz de compactación del fondo de cimentación hasta alcanzar los valores establecidos.

Los parámetros mecánicos permiten definir un cuadro de la resistencia mecánica del terreno en un punto preciso cercano a la inyección de resina. Para conseguir esto se consideran útiles las pruebas penetrométricas distribuidas en los puntos más adecuados según la opinión del técnico experto y cualificado (Ingeniero/Geólogo).

(5) *Resinas expansivas*.- Formulación química termoplásticas poliuretánicas mono y bi componente. Los usuarios profesionales diferencian dichas resinas para la consolidación en dos categorías: resinas de rápido inicio de expansión y resinas de lento inicio de expansión.

Se podrá también considerar una posible variación de los valores siendo conscientes que habrá una dificultad de interpretación de los valores de esfuerzo/deformación del terreno a causa de la heterogeneidad marcada que ha causado el asentamiento.

Considerando que el terreno está constituido por tres fases (sólida, líquida y gaseosa) es necesario tener cuidado a la mutación físico-química posterior a la inyección. De hecho, cuando se inyecta una resina en un terreno que presenta vacíos, ésta, gracias a su reacción química se unirá a la parte sólida del terreno colmatando los vacíos y alejando el agua intersticial presente.

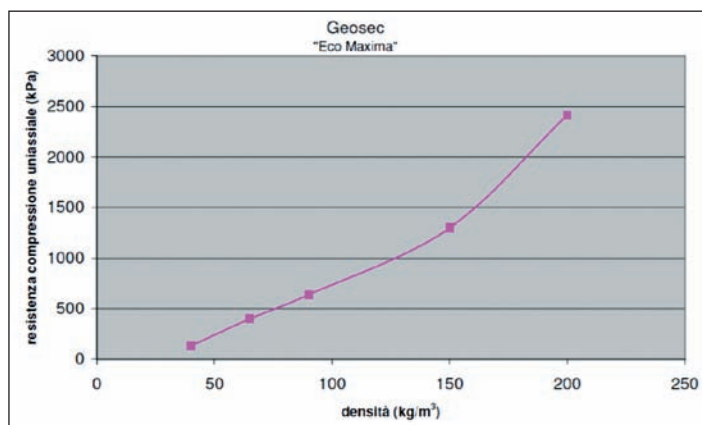
En terrenos cohesivos, en particular en los *arcillosos*, se sabe que la presencia de agua puede ser significativa durante las estaciones prevalentemente lluviosas. En estas litologías el agua, por su carácter no comprimible, resulta ser muy difícil de alejar rápidamente, por lo tanto es importante pensar en cómo gestionar la inyección de resina expansiva en condiciones de terreno con muy poco drenaje.

Por ejemplo en la **Fig. 5**, se puede observar los diferentes valores de resistencia a compresión uniaxial de la resina *Eco Maxima* en función de la diferente densidad de la formula (Geosec, 2006.). El estudio se ha llevado a cabo en los laboratorios de la Universidad de Estudios de Parma y en los laboratorios R&S de Parma (2008). La resina ha demostrado tener propiedades de resistencia a compresión y buenas capacidades de resistencia a tracción y a flexión.

Se observa como el proceso de consolidación del terreno tratado se lleva a cabo en un tiempo que resulta ser más largo (meses, años) respecto al tiempo de reacción y de expansión mecánica de la resina inyectada (segundos, minutos). En condiciones particulares el alejamiento del agua intersticial, empujada por la resina (en fase de expansión) no será tan inmediato como la acción mecánica de la fuerza expansiva.

Este agua, que se encuentra bajo la cimentación sin posibilidad de salida, y si es empujada por la resina, puede contribuir de inmediato al levantamiento mecánico de la estructura pero, en un segundo momento, se redistribuirá, según la permeabilidad del terreno, en un tiempo más largo respecto al tiempo de la reacción expansiva. Es evidente la importancia fundamental de la comprobación de la presencia y de la distribución del agua en el terreno a tratar, antes de las inyecciones.

Sería diferente el caso en el que el *asentamiento diferencial* resultara causado por el cambio en las condiciones del terreno de cimentación respecto a las condiciones originales, sin que se hayan llevado a cabo modificaciones estructurales del fabricado. En estos casos las acciones naturales (variaciones cli-



[Figura 5] .- **Resistencia a compresión uniaxial de muestras de resina Geosec "Eco Maxima" (valor promedio de 6 muestras) determinada según la normativa UNI 63502-68 del Laboratorio R&S (Geosec, 2006).**

máticas, interferencia con agua subterránea y flujos de fluidos en el terreno, plantas altas etc.) y las acciones antrópicas (vibraciones causadas por el tráfico de vehículos, excavaciones cercanas, pérdidas en la red de saneamiento etc.) pueden alterar los equilibrios del sistema y causar asentamientos diferenciales incluso muy rápidos y evidentes.

Queda claro que si el terreno ha sufrido una modificación, esta ha sido causada por la presencia de agua y vacíos será necesario estudiar su interior con instrumentos y diagnosis adecuadas para poder reconocer las causas del asentamiento y poder proyectar una intervención resolutive.

En caso que el asentamiento haya sido producido por una pérdida en la red de alcantarillado, por la presencia de fluidos en el terreno, donde haya presencia de arcillas expansivas sensibles al cambio de estaciones, donde haya fuertes vibraciones que hayan producido nuevas porosidades, donde la acción de una planta alta haya creado discontinuidades cercanas a una cimentación, será fundamental ampliar el análisis del problema a una visión más abierta y tridimensional del contexto que permita reconocer la distribución espacial de los parámetros analizados y su correlación con el problema del asentamiento.

El estudio geoelectrico sustenta las inyecciones de resinas expansivas

Los estudios geofísicos no invasivos basados en la resistividad eléctrica, mediante el empleo de las técnicas tomográficas tridimensionales (3D) de vanguardia, facilitan los datos que describen la distribución en el terreno de fluidos, porosidades, cavidades, es decir aquellas características del subsuelo a las cuales la resistividad eléctrica resulta sensible y, si se juntan a una prueba mecánica permiten definir la litología del subsuelo estudiado en tres dimensiones (Fig. 6).

Si dichos estudios se superponen a los datos de la dinámica en el tiempo de los asentamientos estructurales, pueden ayudar al técnico en la evaluación de las causas que han pro-

ducido el asentamiento (ej. Lavados de terreno, agua intersticial etc.); esta información es útil porque permite al técnico proyectar, comprobar y validar su trabajo durante una intervención con resinas expansivas.

Las razones que llevan a considerar este parámetro de análisis son diferentes:

1) En primer lugar, el asentamiento diferencial no siempre es un problema de aumento de capacidad de carga del terreno de cimentación; en este caso tiene más importancia entender cómo se obtiene dicho aumento y si dicho efecto se puede garantizar en el tiempo, por lo tanto el parámetro mecánico puede no resultar suficiente a la hora de describir el resultado obtenido. Seguramente la compactación del terreno de cimentación, gracias a la fuerza expansiva de las resinas, es uno de los diferentes resultados conseguidos, pero lo que hay

que determinar es cómo se ha llegado de forma correcta a esta compactación.

Las resinas expansivas poliuretánicas no se inyectan a alta presión, sino que utilizan la fuerza de expansión producida directamente por la reacción química, cuya entidad mecánica se define simplemente por el contraste ofrecido por el ambiente en el que se realiza la inyección. La velocidad de reacción es rápida si es comparada con el tiempo de consolidación de los terrenos cohesivos. En estos casos, gracias al empuje mecánico de la resina (punto de máxima energía) los volúmenes de agua intersticial comprimida llegan bajo la cimentación. Inevitablemente, unos días/semanas después el agua filtrará y disminuirá dependiendo de la permeabilidad del terreno. Por lo tanto habrá que monitorizar con precisión, tanto antes, como después de las inyecciones, la presencia de estas concentraciones de agua para poderlas alejar eficazmente del volumen significativo de cimentación, actuando con el mínimo impacto mecánico, midiendo las inyecciones (pequeñas dosis) y realizándolas con una pausa (pocos minutos) entre una y la otra.

Como ya se ha dicho, la *resistividad del subsuelo* de cimentación está condicionada por la presencia de agua y precisamente por eso la tomografía secuencial de la resistividad eléctrica describe la variación de los fluidos antes, durante y después de las inyecciones; dicha tomografía puede demostrar si durante la intervención de consolidación, no obstante hayan sido inyectados varios kg de resina, el agua intersticial, bajo presión producida por la expansión de la resina, sigue participando en la acción de compresión.

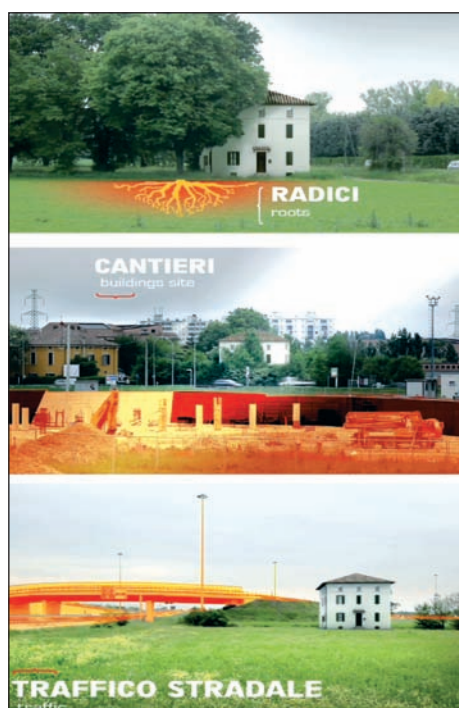
2) Una buena parte de las litologías que se encuentra en los suelos superficiales (ej. Arcillas, limos, arenas) tienen intervalos de valores de resistividad muy característicos que las diferencian las una de las otras. El mismo principio vale para la comparación entre los suelos y los materiales que constituyen las cimentaciones.

Dichos intervalos se expresan en la **Tabla II**.

3) Las *resinas expansivas* utilizadas para las inyecciones, en algunos casos, entran en contraste con el terreno de cimentación.

Queda claro que, en la restitución de la tomografía 3D, los estudios geoelectricos pueden representar para el geólogo un buen soporte diagnóstico en las intervenciones de contraste de los asentamientos mediante *resinas expansivas* y en las diferentes etapas de evolución de la intervención misma.

La *tomografía eléctrica* pre-intervención facilita una primera clasificación de los terrenos encontrados (arenosos, arcillosos etc.) y permite evidenciar las anomalías importantes presentes en el subsuelo que pueden representar elementos geológicos distintivos o causas directas o indirectas del asentamiento (concen-



[Figura 6] .- a), b), c) algunas condiciones de interferencia con el equilibrio del sistema terreno/cimentación (Geosec, 2009).

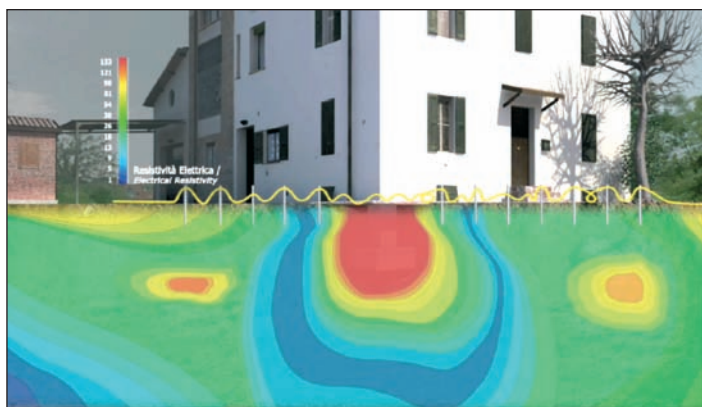
LITOTIPO	RESISTIVIDAD (Ωm)
Agua dulce	10 - 100
Agua marina	0.2 - 0.3
Arenas sueltas secas	~1000
Arenas sueltas saturadas en agua dulce	80 - 150
Limos saturados en agua dulce	15 - 50
Arcillas saturadas en agua dulce	5 - 20
Gravas secas	> 1000
Gravas saturadas en agua dulce	150 - 300

[TABLA II].- Intervalos de resistividades en función del litotipo.

traciones de agua y/o humedad, volumen de lavado de terreno por pérdidas en la red de alcantarillado o vibraciones, discontinuidades del tipo arcilla/roca, rellenos/arcillas). Las tomografías eléctricas pueden ser superpuestas a los datos relativos a la dinámica estructural del asentamiento (monitorización del cuadro de lesiones del edificio) y a las pruebas mecánicas *in situ* (Fig. 7).

Durante la obra, las *tomografías eléctricas* realizadas en tiempo casi real y en diferentes momentos, permiten verificar el estado de avance de las inyecciones y modificar los parámetros iniciales del proyecto.

Al término de la intervención las medidas *a posteriori* permiten verificar el estado final del subsuelo después de la inyección de resinas expansivas y validar el resultado final.



[Figura 7].- Imagen de la tomografía eléctrica del terreno de cimentación (Geosec, 2009).

Con la expresión *resistividad eléctrica* (símbolo) entendemos la propiedad física que representa la capacidad de un material de volumen cubico con lado unitario a oponer resistencia al paso de una corriente. Se trata por tanto de una propiedad física independiente de la geometría del cuerpo atravesado ($\Omega.m$).

Mientras que se define la *resistencia eléctrica* (R) como magnitud que expresa (medida en Ω) la propiedad de un material con cualquier forma a oponerse al flujo de una corriente eléctrica. (Según la primera ley de *Ohm*, la R de un hilo conductor puede definirse como la relación entre la diferencia de potencial medida en sus extremos y la intensidad de corriente que lo atraviesa); en otras palabras, la *resistencia* se diferencia de la *resistividad* porque depende además de las características geométricas del medio expuesto al paso de corriente.

El objetivo de la tomografía de resistividad eléctrica (*ERT* acrónimo de *Electrical Resistivity Tomography*) es aquel de recrear una imagen tridimensional de la resistividad del subsuelo del cual deducir una información tan importante para la comprensión de un asentamiento, como: la geometría de la cimentación del edificio, la presencia de cavidades o huecos, estructuras enterradas, presencia de humedad y agua en el terreno, incluso la presencia de pérdidas de fluidos de implantes enterrados.

Desde el punto de vista del método el *ERT* utiliza la técnica de medida de un *SEV*, induciendo una corriente eléctrica al terreno a estudiar mediante una pareja de electrodos (*A-B*) y recibiendo con otros (*M-N*), medir la diferencia de potencial (ΔV) obtenido, la diferencia es que lo realiza utilizando un número elevado de electrodos dispuestos simultáneamente sobre el terreno. En la práctica se obtiene disponiendo una serie de electrodos en número variable y organizados según una determinada geometría, rodeando el área a estudiar o en el interior de la misma.

Un instrumento (*georesistivímetro*) emite una corriente eléctrica continua (energización) en una pareja de electrodos y mide contemporáneamente potenciales eléctricos que se reciben de su pareja electrodica. La medida de la resistividad eléctrica se realiza mediante la reducción a un esquema cuadripolar. En medios homogéneos e isótropos la resistividad (ρ) se expresa como:

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

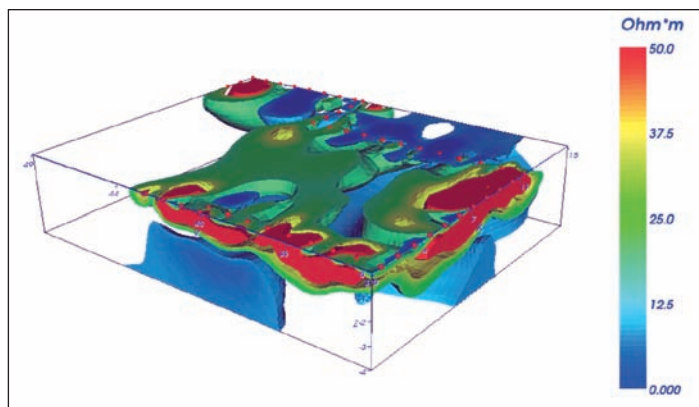
Donde K es el factor geométrico del cuadripolo, función que depende de la posición reciproca de los electrodos:

$$K = \frac{2\pi}{(1/r_1 - 1/r_3 - 1/r_2 + 1/r_4)}$$

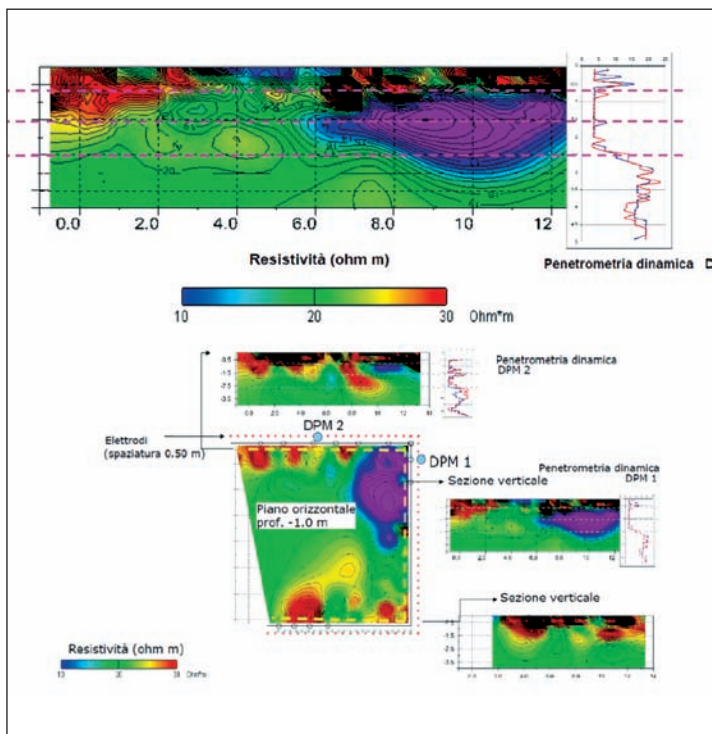
Siendo r_i las distancias reciprocas entre los cuatro electrodos. Si el medio no fuese homogéneo la diferencia de potencial ΔV estará en función, además de la distancia de los electrodos, de la distribución de la resistividad en el medio investigado. Por tanto, el valor (ρ) calculado mediante la ecuación arriba reflejada, es denominado *resistividad aparente* y puede interpretarse como la resistividad de un medio homogéneo e isótropo que se ha energizado con igual corriente de la misma diferencia de potencial entre los electrodos.

A la fase de obtención de medidas de resistividad aparente le sigue la de interpretación de las mismas: en jerga técnica se habla de *inversión*, técnica que prevé algoritmos de modelización con elementos finitos (o a las diferencias finitas) y una metodología de optimización mediante mínimos cuadrados.

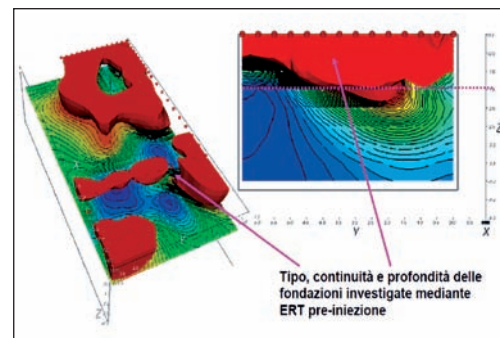
El procedimiento (interactivo) de resolución consiente en cualquier situación una evaluación de la distribución de la resistividad en el medio investigado que se traduce en una imagen gráfica de intuitiva comprensión. Intuitivamente se puede comprobar que para la ob-



[Figura 8].- Representación 3D de la distribución de resistividad ρ en un terreno de cimentación (Geosec, 2009).



[Figura 9].- En morado: representación ERT de una pérdida en la red de alcantarillado bajo una vivienda (Fischanger, Occhi 2007).



[Figura 10].- En rojo: a) representación 3D de una estructura de cimentación; b) sección 2D cercana a la cimentación continua de un edificio residencial que presenta desarrollo horizontal y profundidad de la estructura (Geosec, 2008).

tención de una imagen como las recogidas en las (Figs. 8 y 9) es necesario inducir al terreno una corriente continua en más puntos.

Se refleja la distribución de la resistividad del medio atravesado por la corriente variando en función de las características físico químicas propias de cada material. Los datos obtenidos (resistividad aparente) sirven para construir un modelo matemático que permite restituir una imagen 3D del terreno, al que se le asigna una registro dentro de la escala cromática, en el que diferenciar volúmenes de terreno homogéneo que se corresponden a un mismo valor de resistividad que representa cualitativamente la naturaleza del medio atravesado diferenciando cada una de las litologías, minerales y metales, materiales de construcción (cemento, ladrillo, etc.) humedad y/o agua en el terreno. En las imágenes de las figuras 8 y 9 podemos diferenciar los volúmenes de terreno con presencia de agua (en color azul), pérdidas al terreno de una red de saneamiento (color violeta - imagen de la Fig. 9).

Cada color de la imagen representa una determinada resistividad estimada.

Como método de control de las inyecciones juega un importante papel detectando el posicionamiento de la resina (si efectivamente se emplaza en una macro cavidad o si es efectivo la reducción y alejamiento del agua intersticial presente en el terreno en el que se interviene, (como ocurre en terrenos arcillosos).

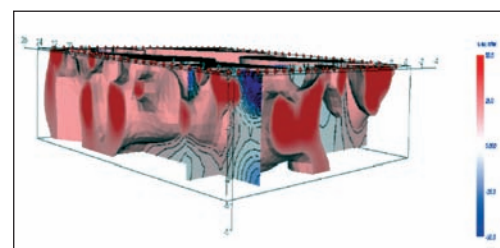
Este sistema diagnóstico permite el poder confrontar, en plena operatividad y transcurso del trabajo, la imagen previa a una inyección con la que durante y/o a la finalización de la

misma resultaría producto de la interacción con el terreno, permitiendo al técnico visualizar una única imagen final (Figs. 11 y 12) con las diferencias de resistividad obtenidas gracias a la resina inyectada.

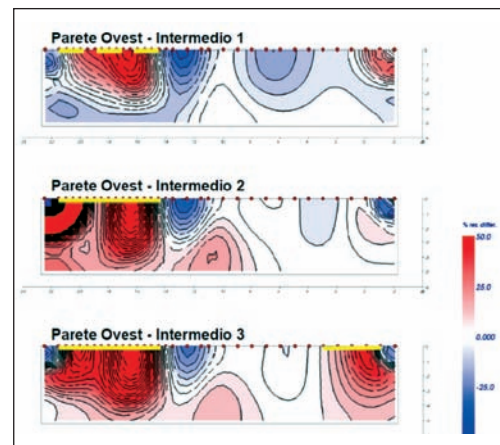
También en este caso, con el fin de ayudar a aclarar los conceptos hasta aquí expuestos, con una escala cromática, mas simplificada que la precedente, donde en color rojo se indican los volúmenes de terreno que han incrementado su resistividad. ($\Delta\%$, variación % de resistividad), en particular, en la figura 12, vemos la variación de resistividad tras dos secuencias de inyección. La primera en el lado izquierdo y la segunda en el lado opuesto derecho.

En un terreno con baja resistividad por la marcada presencia de agua, gracias a las inyecciones expansivas incrementa su resistividad (en color rojo) implicando que se ha llevado a cabo una reducción del contenido en agua que se va drenando.

Se trata por tanto de un método que nos da información precisa acerca de las causas de los asentamientos y permite el control y verificación de procesos tales como el relleno de cavidades o alejamiento del agua desplazados por la expansión de la resina hacia puntos de menor energía.



[Figura 11].- Representación 3D de la variación % de resistividad ($\rho\Delta\%$) > 30% post intervención mediante inyecciones. (Fischanger, Morelli, Douglas, Occhi 2007).



[Figura 12].- Representación 2D de la variación % de resistividad durante dos secuencias de inyecciones, la primera en la parte izquierda y la segunda en la derecha (Fischanger, Morelli, Douglas, Occhi 2007).

GEOSEC ESPAÑA, S.L.



Avda. San Pablo, 31 - nave 23
28823 Coslada (Madrid)
☎: 916 717917 • Fax: 916 737 334
E-m: tecnico@geosec.es
Web: www.geosec.es