

Evaluación de la eficiencia de las inyecciones de resinas expansivas para la consolidación de terrenos bajo la cimentación mediante ensayos geotécnicos y estudios de tomografía eléctrica tridimensional.

Apuani T., Giani G. P.

Departamento de Ciencias de la Tierra “A. Desio”, Università degli Studi di Milano, Milan, Italy

D’Attoli M.

Geosec Srl, Parma, Italy

Fischanger F.

Geostudi Astier s.r.l., Livorno, Italy

Ranieri G.

Departamento de Ingeniería del Territorio, Università degli Studi di Cagliari, Cagliari, Italy

Santarato G.

Departamento de Ciencias de la Tierra, Università degli Studi di Ferrara, Ferrara, Italy

RESUMEN

Las técnicas de consolidación de terrenos a través de inyecciones de resina expansiva han sido utilizadas con éxito, cuando las causas del asentamiento diferencial vertical de las estructuras de cimentación dependen de alteraciones naturales y/o antrópicas del terreno bajo la cimentación y/o de una planificación/ejecución de la obra no correcta. Entre las diferentes técnicas de consolidación de terrenos mediante inyecciones de resinas expansivas, se ha creado un procedimiento que prevé, junto a los tradicionales ensayos geotécnicos, la aplicación de métodos geofísicos, en particular el de la tomografía de la resistividad eléctrica 3D para adquirir, también en los volúmenes de terrenos de difícil acceso, la información necesaria para el proyecto de consolidación y para su monitorización durante la obra. Según esta tipología de intervención y con características similares a las condiciones de la obra, se presentan los resultados obtenidos en un campo de ensayo real en el que se han realizado inyecciones de resina expansiva de poliuretano bicomponente.

Palabras clave: consolidación terreno, estudios geotécnicos y geofísicos

1 Consolidación de terrenos con resinas

1.1 Introducción

La aplicación de técnicas de consolidación del terreno con resinas ha aumentado en los últimos años, sobre todo tras el desarrollo de nuevos materiales y metodologías estudiados precisamente para este sector.

Las primeras intervenciones se realizaron a mediados de los años cincuenta en Estados Unidos y en los años noventa en Europa. Hoy en día están disponibles en el mercado para diferentes aplicaciones. Entre las más comunes recordamos las técnicas de consolidación mediante inyección, de libre difusión, de resina en el terreno y las técnicas mixtas que unen la resina inyectada a un elemento estructural de carga conectado a la cimentación existente para el traslado de la carga en profundidad. El interés causado por este tipo de intervención es debido a la extrema eficiencia del tratamiento que resulta resolutivo incluso a largo plazo. Se trata además de una intervención poco invasiva de la cual se garantiza la máxima compatibilidad ambiental. En fin, no hay que subvalorar algunos aspectos prácticos como la rapidez, la flexibilidad de la intervención y la posibilidad de operar en cualquier lugar con medios poco voluminosos.

La finalidad de las técnicas de consolidación con

resinas es eliminar las causas de los asentamientos de las cimentaciones mediante la inyección, en el terreno, de un material polimérico expansivo. Los tratamientos de inyección quieren solucionar los problemas que causan el asentamiento y el hundimiento del terreno, cuyas consecuencias son los daños en edificios y estructuras.

En la mayoría de los casos, los asentamientos del terreno se deben a períodos de sequía alternados a lluvias intensas, pérdidas en la red de saneamiento, tráfico intenso de vehículos, excavaciones en las inmediaciones del edificio, raíces de plantas de alto fuste y variación de la carga aplicada. La interacción de agua y terreno de cimentación es uno de los mecanismos más importantes y es un factor crítico para todos los tipos de terreno. Los terrenos arcillosos tienen la capacidad de absorber grandes cantidades de agua y eso lleva a un aumento de volumen. Por el contrario, la pérdida de agua se traduce como una disminución del volumen de terreno. Si a períodos de lluvias abundantes se alternan períodos de sequía, el terreno sufre ciclos de aumento y disminución de volumen que llevan a la creación de vacíos y a posibles asentamientos diferenciales.

En terrenos granulosos, en cambio, la permeabilidad es mayor y el agua circula transportando materia fina. Una circulación hídrica en el subsuelo puede llevar a la creación de vacíos y cavidades, muchas veces concausa de los asentamientos.

1.2 La técnica de intervención

La técnica Geosec de consolidación con resina prevé la inyección del material polimérico en volúmenes de terreno afectados por el asentamiento. Las propiedades de la resina tienen, obviamente, mucha importancia. Tras la inyección la resina se expande rápidamente, ya 40 segundos después del contacto con el terreno, a través de una reacción química exotérmica, contrarrestando el asentamiento de forma activa. El efecto observado es tríplice:

- Colmatación de vacíos;
- Compactación;
- Reducción del agua intersticial.

La resina se inyecta directamente en los puntos establecidos a través de tubos de diámetro pequeño. La cantidad y la fórmula cambian dependiendo de la tipología del problema y, en el caso de la técnica aquí descrita, también de los resultados de las diagnósticos geofísicos y geotécnicos obtenidas antes y durante las inyecciones. Gracias a los efectos observados durante las inyecciones, a través de una monitorización continua de la intervención, se pueden adecuar las cantidades de resina, la geometría y la secuencia de las inyecciones. Considerando que la fuerza expansiva de la resina es el resultado de la reacción química (es decir de su fórmula) y no de la presión de inyección de la bomba, en algunos contextos (por ejemplo en terrenos que presentan evidentes concentraciones de agua) existe el riesgo de generar una presión excesiva que puede causar la fractura del terreno o puede hincharlo provocando un levantamiento anómalo de la cimentación. Por el contrario, una cantidad insuficiente de material no garantiza la colmatación de los vacíos y no contribuye a la consolidación final del terreno. La fase de planificación de la intervención resulta ser delicada y fundamental. Tiene que prever:

- Definición del problema, con identificación de las posibles causas del asentamiento;
- Deducción del modelo geológico y geotécnico del terreno;
- Definición del tipo de intervención;
- Control de la eficacia de la intervención.

En la técnica de intervención, a esta secuencia se une el estudio geofísico de la tomografía eléctrica tridimensional realizado tanto en la fase de planificación, que durante la intervención para que sea posible obtener una imagen del subsuelo en cada una de las fases de la obra. Durante la fase de conocimiento, la tomografía ayuda a individuar las posibles causas o concausas del asentamiento, como la presencia de cavidades en el subsuelo o de agua intersticial. Durante las inyecciones esta herramienta puede distinguir eficazmente la colmatación de los vacíos y el alejamiento del agua intersticial del volumen de terreno tratado.

Las herramientas propias de la técnica de inyección se juntan siempre con criterios y sistemas de control y monitorización de la intervención: además de la tomografía eléctrica, también los ensayos geotécnicos de resistencia y deformabilidad juegan un papel importante.

Los ensayos de penetración, realizados antes y después de la intervención, se utilizan para evaluar el aumento

efectivo de resistencia una vez realizada la inyección.

Recordamos que una experiencia profesional adecuada en el sector, enriquecida por una importante capacidad de observación de los fenómenos, juega un papel importante en la gestión de la intervención.

Considerando que la literatura científica de este sector es muy “joven”, la finalidad de este informe es contribuir a la mejora de los conocimientos acerca de este tema, buscando relaciones directas entre las inyecciones y la mejora del terreno tratado y favoreciendo la comprensión de los mecanismos que llevan a estas mejoras.

Para eso se ha construido un campo de ensayos en escala real donde se han realizado estudios geotécnicos in situ, antes y después del tratamiento de los terrenos con resina junto a ensayos geotécnicos de laboratorio realizados en muestras de terreno “no afectado” y en muestras de terreno que ha sido objeto del tratamiento con resinas.

Conforme al procedimiento adoptado en la obra, se han realizado estudios geofísicos de tomografía de la resistividad eléctrica para adquirir, en los volúmenes de terreno de difícil acceso o que no han sido objeto de estudio de las pruebas geotécnicas, los datos necesarios para el proyecto de consolidación y para su monitorización durante la obra.

Las características de resistencia y de deformabilidad del terreno, anteriores y posteriores a la intervención obtenidas gracias a los estudios geotécnicos, han sido comparadas con los estudios geofísicos.

1.3 La resina expansiva

Las propiedades mecánicas de la resina utilizada llamada “Eco-Maxima” (Geosec, 2006) han sido estudiadas en los laboratorios de la Universidad de Estudios de Parma y en los laboratorios R&S de Parma.

La resina tiene propiedades considerables de resistencia a la compresión y buenas capacidades de resistencia a tracción y flexión.

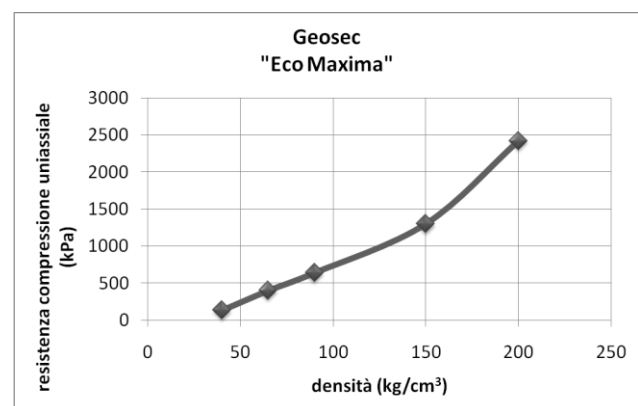


Figura 1. Resistencia a la compresión mono-eje de muestras de resina Geosec “Eco-Maxima”, (promedio de 6 muestras) determinada según la norma UNI 6350-68 por el Laboratorio R&S (datos Geosec, 2006).

Pruebas de resistencia a la compresión mono-eje realizadas en muestras de resina de diferentes densidades

(de 40 a 200 kN/m³) proporcionan valores de resistencia comprendidos entre 133 y 2420 kN/m² (figura 1).

1.4 La monitorización de las inyecciones a través de la tomografía de la resistividad eléctrica tridimensional

La tomografía de la resistividad eléctrica tridimensional (ERT 3D), utilizada para la monitorización de las inyecciones es un método de estudio geofísico que permite determinar la distribución de la resistividad eléctrica de los volúmenes de subsuelo objeto de estudio. La técnica mide los potenciales derivados de la inmisión de corriente eléctrica continua en el terreno, permitiendo observar las variaciones litológicas, las condiciones de saturación del terreno, las cavidades, las estructuras enterradas u otras anomalías, basándose en el comportamiento diferente de dichos medios. Desde el punto de vista de la interpretación, para llegar de las medidas ERT a la determinación de la distribución de resistividad del subsuelo, es necesario utilizar estrategias de *inversión* que prevén la división del terreno en bloques (de forma hexaédrica) y la resolución numérica de las ecuaciones diferenciales, que describen el fenómeno, a través de técnicas de Elementos Finitos, a los que se asocia el uso de algoritmos de optimización iterativos a los Mínimos Cuadrados (Morelli and LaBrecque, 1996).

Gracias a la extrema sensibilidad del método ERT a las dinámicas de los fluidos en el subsuelo, esta técnica de estudio se adapta a la monitorización durante la obra del tratamiento de inyección. El mecanismo de distribución en el terreno de resinas de poliuretano (que representan un medio con alta resistividad eléctrica) prevé una difusión de tipo dendrítico: los filamentos de este material no afectan de forma significativa el flujo de la corriente eléctrica en el subsuelo y las variaciones de resistividad que se pueden observar durante la obra se atribuyen al efecto del alejamiento del agua intersticial y a la colmatación de vacíos posteriormente a la acción de compactación provocada por la expansión de la resina. Basándose en dichos conceptos se ha desarrollado la técnica aquí descrita. En la obra esta técnica sigue cuanto explicado más adelante (Fischanger et al., 2007).

1. Un estudio ERT preliminar a la intervención de inyección se realiza para definir las condiciones iniciales del terreno a consolidar. La representación tridimensional de la distribución de la resistividad en el subsuelo, junto a la información obtenida gracias a las pruebas geotécnicas (de penetración y otras), permite una primera clasificación de los suelos. Además la tomografía permite describir, con mayor o menor resolución dependiendo de los casos, la tipología, la continuidad y la profundidad de la cimentación, y pone en evidencia posibles anomalías debidas a la presencia de vacíos, de agua intersticial u otros elementos litológicos.
2. Los datos geofísicos preliminares se juntan a los datos geotécnicos y estructurales disponibles (cuadro de lesiones, geometría de la cimentación, cargas) y favorecen la proyección detallada de la intervención: colocación, número, profundidad de las perforaciones de inyección, cantidad de resina a inyectar.
3. Durante la intervención de inyección los estudios ERT

intermedios, realizados utilizando los mismos electrodos proyectados en la fase 1, se efectúan para estudiar el estado del volumen de terreno afectado por el asentamiento y las variaciones de los fluidos presentes en el subsuelo con el fin de volver a proyectar la intervención en tiempo real basándose en los resultados obtenidos.

4. Una vez finalizada la intervención se realiza un último estudio ERT post-tratamiento para verificar las condiciones finales de los suelos tras el tratamiento de consolidación.

2. EL CAMPO DE ENSAYOS: PRUEBAS GEOTÉCNICAS Y MONITORIZACIÓN CON ERT 3D

2.1 El campo de ensayos

Para evaluar el tratamiento de consolidación de los terrenos bajo la cimentación mediante la inyección de resina expansiva se ha preparado, en colaboración con Geosec srl, un campo de ensayos en el que se han realizado pruebas geotécnicas y geofísicas antes y después de la simulación de una intervención, respetando el mismo procedimiento utilizado en una obra real.

El área de estudio se encuentra en la parte noroeste de Parma, en el Ayuntamiento de Collecchio, cerca de la zona montañosa que empieza en la zona sur respecto a dicho lugar y se desarrolla en la zona noroeste-sureste rodeando la parte sur de la Llanura Padana.

El subsuelo está caracterizado por una acumulación de sedimentos aluviales cuaternarios que apoyan en un sustrato de sedimentos marinos del Plioceno Superior y del Pleistoceno Inferior. Procediendo hacia la zona suroeste el espesor de dichos sedimentos se vuelve más fino y alcanza su espesor mínimo en las cercanías de la vivienda en cuestión, en Collecchio

La superficie de la mayor parte del territorio está cubierta con paleosuelos en diferentes estados de evolución. Se trata sobre todo de limos y arcillas con presencia de gravas y arenas que alcanzan una profundidad de 3 metros.

El campo de ensayos es de uso agrícola, hoy inculto. En el área objeto de estudio, cuya extensión es de 6 x 12 m², se aislaron dos porciones cuadradas contiguas de 6 metros de lado cada una (figura 2). En la primera porción se han realizado tratamientos de consolidación, mientras que en la segunda no se ha realizado ningún tipo de tratamiento. Con el fin de evaluar las modificaciones causadas por la inyección de resina en el terreno, en ambas áreas se han realizado pruebas geotécnicas y geofísicas para identificar el tipo de terreno y los parámetros de resistividad y deformabilidad correspondientes.

El tratamiento de consolidación prevé la ejecución de 39 inyecciones, la mayoría ejecutadas a una profundidad de 150 cm desde el nivel del terreno, a lo largo del perímetro del área 6 x 6 m² objeto del tratamiento, a distancia de 1 m la una de la otra. Algunas repeticiones de la inyección se han efectuado en un mismo punto a una profundidad de 250 cm desde el nivel del terreno.

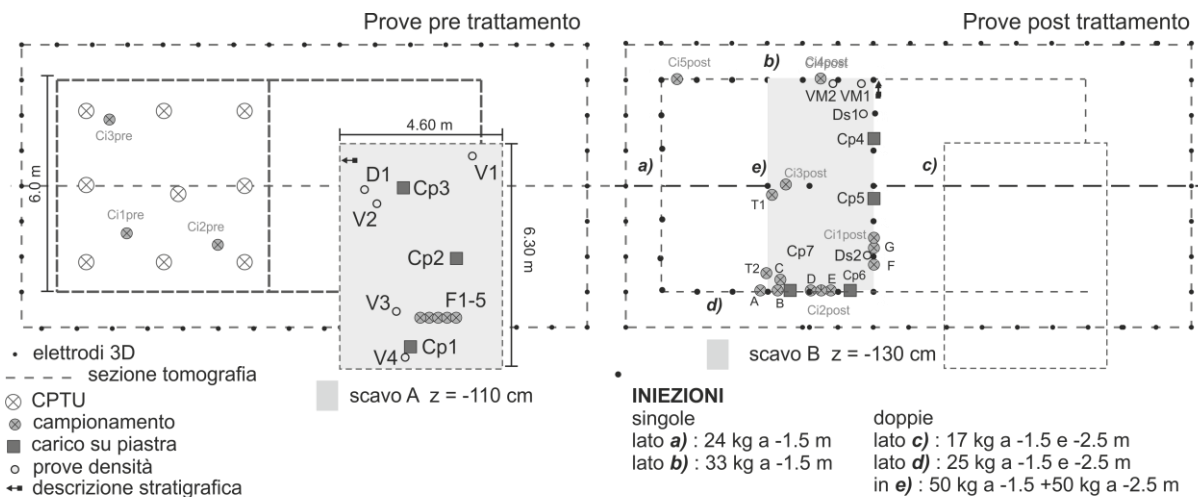


Figura 2. Mapa del campo de ensayos con la ubicación específica de los lugares de realización de los ensayos y de las pruebas geotécnicas y geoelectricas.

Los identificativos de las pruebas o de los ensayos son: V = prueba de densidad con volumenómetro de membrana; D = prueba de densidad con volumenómetro de arena; VM = prueba de densidad con volumenómetro de membrana post tratamiento; Ds = prueba de densidad con volumenómetro de arena post tratamiento; Cp = prueba de carga en placa; F = ensayos con troquel.

Los estudios se han llevado a cabo en tres fases.

En el día dedicado al tratamiento de consolidación se han efectuado pruebas penetrométricas estáticas CPTU antes, durante y después de la fase de inyección, por un total de 27 pruebas (9 preliminares, 9 intermedias y 9 post-intervención). Utilizando un sacamuestras se han cogido muestras de terreno tratado y no tratado (figura 2). La fase de consolidación ha sido monitorizada a través de estudios geofísicos de tomografía eléctrica 3D, con la adquisición de 39 grupos de medidas ERT correspondientes a las pruebas intermedias realizadas después de cada inyección de resina. Para la monitorización se ha utilizado un sistema de 48 electrodos colocados a una distancia de 1 metro el uno del otro según una geometría rectangular 8 m x 16 m que ha rodeado las dos porciones – la afectada y la no afectada – del campo de ensayos, como representado en la figura 2. La comparación de todos los estudios ha permitido individuar las características litoestratigráficas del lugar y obtener algunos parámetros del terreno de forma indirecta, evitando excavaciones. Tanto los sacamuestras como las pruebas penetrométricas han causado una modificación, aunque mínima, de las características mecánicas del terreno cercano a los puntos en los que se han realizado. Esto se ha tenido en cuenta a la hora de realizar las pruebas siguientes.

En una segunda fase se ha procedido a la realización de una excavación y a la remoción del terreno hasta una profundidad de - 110 cm desde el nivel del terreno (excavación A figura 2) en el área contigua a la zona tratada con resinas, con el fin de obtener secciones estratigráficas y un plano de apoyo en el que realizar pruebas geotécnicas de densidad y de carga con placa y muestreos pre-tratamiento.

En una tercera fase de estudio se ha llevado a cabo una excavación en una porción de terreno hasta una profundidad de - 130 cm desde el nivel del terreno (excavación B figura 2) interviniendo en volúmenes de

terreno interesados por las inyecciones. De esta forma ha sido posible observar directamente la distribución de las resinas en el terreno y preparar un plano de apoyo en el que ejecutar las mismas pruebas in situ post-tratamiento.

Las características físico-mecánicas del terreno, anteriores y posteriores a la intervención han sido testadas por la Universidad de Estudios de Milán.

2.2 Características litoestratigráficas del campo de ensayos

Los datos de la naturaleza del subsuelo, de la estratigrafía y de las variantes granulométricas están proporcionadas por un análisis de:

- Estudios realizados de la excavación (A) y de los ensayos;
- Pruebas penetrométricas CPTU;
- Estudio ERT pre-tratamiento.

La excavación (A) ha revelado características estratigráficas continuas y homogéneas a lo largo de todo el perímetro. Se distinguen dos horizontes: el primero, hasta una profundidad de aprox. 55 cm, está constituido por arcillas y limos de color marrón oscuro y de granulometría homogénea con raros clastos milimétricos. El segundo se extiende hasta el final de la excavación y está constituido por arcillas limosas de un color marrón oscuro-amarillento, plásticas y muy consistentes. Hay presencia de raíces de diámetro centimétrico que llegan a una profundidad de hasta 70 cm desde el nivel del terreno. Los resultados de las pruebas geotécnicas se refieren a muestras cogidas a una profundidad de aprox. 150 cm. Se trata de *limos con arcilla, débilmente arenosos*, es decir CL según clasificación USCS (Unified Soil Classification System, adoptada por ASTM, 1987), contenido org $O=5\div 10\%$, no uniformes (coeficiente de uniformidad $CU=9\div 18$), de media plasticidad (límite líquido $W_L=40-53$ e índice plástico $IP=22-26$), en condiciones de humedad natural $W=13\div 23\%$, consistentes o localmente muy consistentes.

Ensayos de densidad realizados in situ utilizando un volumenómetro de arena (ASTM D1556) y de membrana (ASTM D2167) o en laboratorio con el método del cilindro cortante (ASTM D2937), proporcionan valores de peso de volumen natural $\gamma_o=19.3\pm 0.7\text{ kN/m}^3$, peso de volumen seco $\gamma_d=16.1\pm 0.9\text{ kN/m}^3$, una porosidad calculada $n=33\%$, siendo el peso específico absoluto medido $\gamma_s=25.3\pm 0.5\text{ kN/m}^3$ (valores promedio \pm desviación estándar).

Los ensayos CPTU, que han alcanzado profundidades máximas de aprox. 300 cm desde el nivel del terreno, han permitido obtener los parámetros de resistencia a la penetración Q_c , de resistencia al rozamiento lateral F_s , de la relación de rozamiento R_f , y de la presión U de los poros.

Los datos proporcionados por las CPTU están conformes a cuanto observado en la excavación y a los parámetros geotécnicos obtenidos con el análisis de las muestras.

Hay buena conformidad también con los datos proporcionados por la tomografía eléctrica, véase figura 3, que representa precisamente la información obtenida con las pruebas penetrométricas y tomográficas. En la figura 3b se puede ver una sección vertical de la resistividad eléctrica, extraída en correspondencia del eje central del rectángulo de medida, longitudinalmente al lado largo. La sección representa las variaciones en profundidad de los terrenos objetos de estudio. Se observan los siguientes perfiles electroestratigráficos (en detalle en la figura 3b), propios de la gama de litologías sueltas de la llanura aluvial:

- primeros 40-50 cm de terreno aireado con resistividad de 50-60 ohm m (limos de color bruno);
- hasta 1,5 metros de profundidad, valores de resistividad de 20-35 ohm m (arcillas limosas plásticas);
- una parte más resistiva entre 2 y 3 metros de profundidad (limos con arcilla débilmente arenosa) delimita un estrato más profundo caracterizado por un aumento de resistividad hasta 100-150 ohm m, debido a la presencia de granulometrías más gruesas (arenas).

En la figura 3c se detalla la clasificación litológica, obtenida de la unión de las 9 CPTU pre-intervención, según el esquema de Robertson y Campanella (1982), en relación a los dos niveles estratigráficos de mayor interés para el tratamiento, es decir los que se encuentran en la cota de inyección (-150 cm). Son representativos los valores de Q_c e R_f para la serie de datos entre 100 y 150 cm de profundidad (símbolo gráfico: cruz) y para la serie 150-200 cm (triángulo). Se observa que los valores de resistencia a la penetración más bajos (5-6 MPa), que se refieren al estrato más superficial entre -100 y -150 cm, corresponden a las litologías más conductivas (25-30 ohm m), por una presencia mayor de material fino

2.3 Propiedades geotécnicas pre-tratamiento

Los parámetros de resistencia al corte, obtenidos gracias a pruebas de corte directo (ASTM D3080) en muestras de terreno no afectado, son: cohesión $c'=42-74\text{ kPa}$ y ángulo de resistencia $\phi'=17-21^\circ$.

Se ha considerado que las pruebas de compresión a expansión lateral libre (ELL), realizadas pre y post intervención, podrían ser un instrumento apto para evaluar la eficiencia del tratamiento, según cuanto expresado en la evaluación de control de los tratamientos de inertización (Apuani et al, 2006) y en consideración del problema ingenierístico por el cual las intervenciones se ejecutan. El terreno objeto de estudio tiene una resistencia a la compresión simple $\sigma_c = 208\text{ kPa}$ (valor promedio de 6 muestras) con $\sigma_c=159\div 464\text{ kPa}$, y módulo elástico al 15% de σ_c $E_{15\%}=14.0\div 31.6\text{ MPa}$. Los valores mayores de resistencia y rigidez son propios de muestras afectadas por el ensayo. Los valores de elasticidad obtenidos son coherentes con el comportamiento observado mediante las pruebas de carga con placa realizadas en el fondo de la excavación ($z=-130\text{ cm}$) según las normativas CNR Mod T0116/A (CNR, 1992), con placa de carga de diámetro 30 cm, realizando dos ciclos de carga, con carga máxima 0.35MPa, separados por una rápida fase de descarga. Las pruebas in situ proporcionan los siguientes módulos de compresibilidad: $M_E=13.9\div 22.4\text{ MPa}$ y $M_E'=26.6\div 31.1\text{ MPa}$ calculados respectivamente en la primera o segunda curva de carga.

2.4 Propiedades Geotécnicas post-tratamiento y evaluación geotécnica de la eficiencia

La realización de la excavación B ha permitido conocer la distribución de las resinas en el terreno.

Es muy evidente que la presencia de vacíos o canales pre existentes constituyan la huída preferencial para la distribución de las resinas (figura 4a)

Sin embargo, si dichas posibilidades de huída no están presentes, se observan sistemas de fracturación inducida con direcciones precisas. La configuración de los canales, aunque de pocos centímetros, ocupados por la resina, respeta las direcciones de esfuerzo inducidas por la inyección (figura 4b).

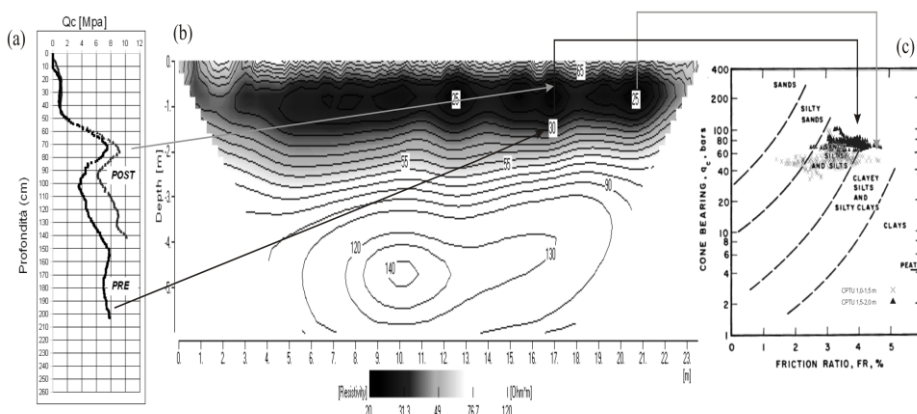


Figura 3. Análisis litoestratigráfica. (a) Comparación de los valores “pre-tratamiento” y “post tratamiento”. Resistencia a la penetración Q_c según prueba CPTU 6; (b) Sección tomográfica ERT (escala vertical adaptada) con detalle de los niveles electroestratigráficos observados; (c) Comparación con la clasificación de terrenos en el diagrama Robertson-Campanella según pruebas CPTU.

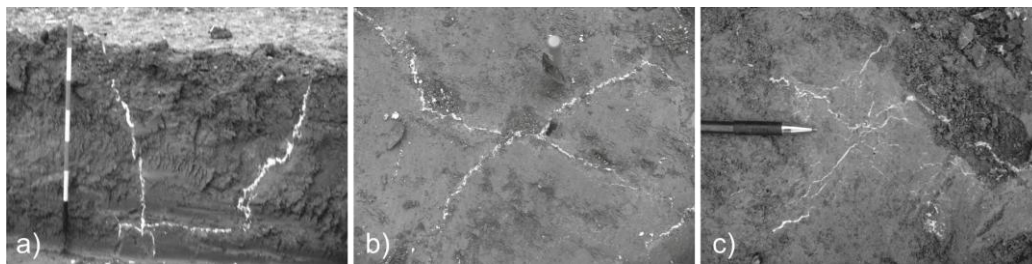


Figura 4: Efectos del tratamiento con resinas: propagación de las resinas en terrenos arcillosos. a) ramificaciones principales y subida a lo largo de los canales más débiles; b) fractura inducida y propagación en el plano horizontal; c) ramificaciones capilares.

Además se constituye una red de resina que “refuerza” el terreno cercano (figura 4c). También el estado de humedad del terreno cercano a las venas disminuye, y también la resistencia a la penetración (pp) y la cohesión no drenada (Cu) que, medidas a lo largo del eje (1m) entre dos inyecciones cercanas, pasan de $pp \approx 350$ kPa con $Cu \approx 130$ kPa a $pp > 441$ kPa con $Cu > 240$ kPa (valores de fondo escala instrumentales). Visiblemente se observa que en las zonas donde no hay presencia de canales, los canales de resina se distribuyen ocupando una superficie de aprox. 1 metro desde el centro de la inyección. Ensayos de densidad, realizadas en la excavación cerca de las inyecciones, permiten obtener el peso del volumen natural $\gamma_o = 19.2 \pm 0.8$ kN/m³ y el volumen en estado seco $\gamma_d = 17.2 \pm 1.1$ kN/m³. No obstante las medidas dependen de la cantidad de resina en el volumen de terreno objeto de estudio, se observa que la densidad general del terreno tratado resulta invariada o no representa un valor significativo para la evaluación del tratamiento. Esto se puede explicar si se considera que la densidad de la resina que ha ocupado espacios vacíos existentes, es menor que la del agua.

También en escala menor las muestras objeto de las pruebas geotécnicas de laboratorio tienen diferentes grados de absorción de resina; las resinas pueden atravesar la muestra en venas o llenarla de forma homogénea; las muestras analizadas son diferentes en función del % de resina presente (<10%, 10-30%, >30%).

La figura 5 compara las curvas esfuerzo-deformación obtenidas a través de las pruebas ELL en muestras no tratadas y tratadas. Las muestras tratadas analizadas tienen una resistencia a la compresión $\sigma_c = 1147$ kPa (valor promedio de 9 muestras) con $\sigma_c = 788 \div 2136$ kPa, y módulo elástico medio $E_{15\%} = 76$ (MPa) con $E_{15\%} = 49.2 \div 128.2$ MPa, que equivale a un aumento de más del 300% en los valores de resistencia a la rotura y de aprox. el 250% en los módulos de elasticidad.

Comparando los valores de compresibilidad obtenidos gracias a las pruebas de carga con placa (figura 6), realizadas en el fondo de la excavación entre dos inyecciones iguales, antes del tratamiento, se observa el aumento considerable de la capacidad máxima del terreno, con $M_E = 28.5 \div 38.6$ MPa y $M_E' = 47.6 \div 58.7$ MPa calculados respectivamente en la primera y segunda curva de carga.

La línea recta punteada en la figura 6 delimita los campos de valores típicos del material “pre-tratamiento” y “post-tratamiento”. Los datos revelan de forma coherente un efecto escala: en la figura, el área sombreada delimita las pruebas de laboratorio con muestras que tienen un diámetro de 5 cm, mientras que la placa de carga tiene un diámetro de 30 cm.

También las pruebas CPTU realizadas después de la intervención confirman la mejora mecánica del área tratada que presenta valores medios de aumento de F_s , Q_c , R_f , (figura 3a) detallados a seguir:

$$\begin{aligned} Q_{c, \text{pre}} &\sim 7 \text{ MPa}, Q_{c, \text{post}} \sim 9 \text{ MPa} \\ F_{s, \text{pre}} &\sim 0.2 \text{ MPa}, F_{s, \text{post}} \sim 0.5 \text{ MPa} \\ R_{f, \text{pre}} &\sim 2.5\%, R_{f, \text{post}} \sim 4.5\%. \end{aligned}$$

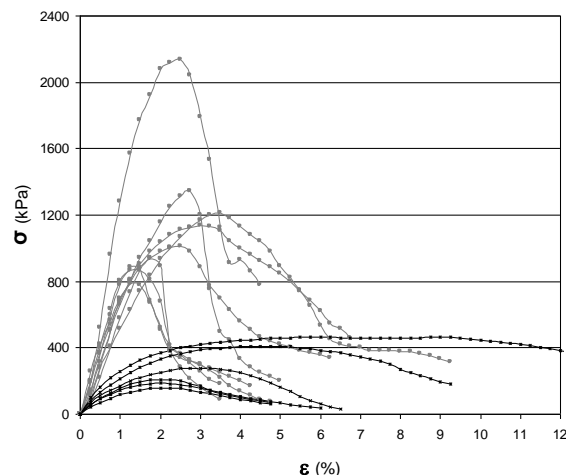


Figura. 5: Curvas esfuerzo-deformación obtenidas realizando pruebas de compresión mono-eje. Las curvas en negro se refieren a muestras “pre-tratamiento”, las curvas en gris a muestras “post-tratamiento”.

2.5 Parámetros geofísicos post tratamiento

Los resultados de los estudios geofísicos pueden ser analizados en dos niveles: en el nivel de “macro escala” podemos observar las variaciones de resistividad eléctrica del volumen de terreno objeto del tratamiento.

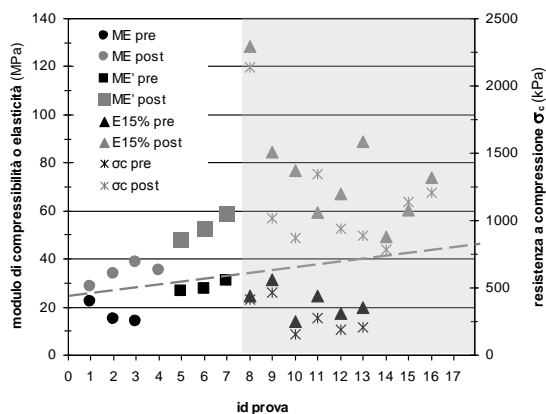


Figura 6: Comparación de los valores “pre-tratamiento” y “post-tratamiento”: Módulos de compresibilidad ME y ME’ (respectivamente del primero y del segundo ciclo de pruebas de carga con placa), módulos elásticos y valores de resistencia de pruebas de compresión a expansión lateral libre (E15%).

Un nivel de análisis del entorno del punto de inyección permite comparar de forma más directa los datos geofísicos y los datos obtenidos con las pruebas geotécnicas in situ y en laboratorio.

En cambio, la figura 7 describe en gran escala las modificaciones del contexto geoelectrico al término de la intervención de tratamiento. Se evidencian los volúmenes que han sufrido una variación de resistividad superior al 20% respecto a los valores iniciales pre-tratamiento. La imagen se refiere a las variaciones % de la resistividad medidas en el terreno una vez finalizado el tratamiento de inyección, respecto a la distribución de resistividad de blanco. Un aumento discreto se puede observar en los volúmenes de suelo en los que la resina ha alejado el agua, compactado y homogeneizado el terreno colmatando los vacíos, mientras que se observa una disminución en las porciones de terreno en las que el agua se ha movido a causa de la acción de las resinas.

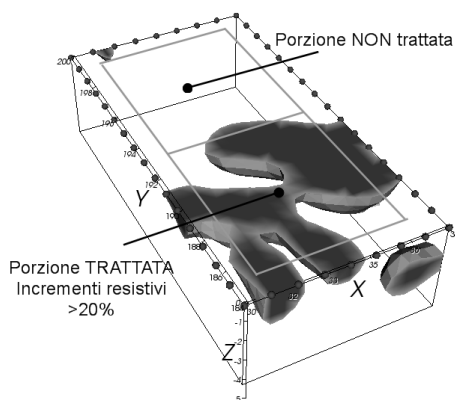


Figura 7. ERT final: volúmenes con variación de resistividad superior al 20% respecto a los valores pre-inyección (blanco).

Para observar en detalle estos resultados podemos describir la evolución de las variaciones de los valores de resistividad eléctrica en el entorno de un punto de inyección, según el esquema representado en la figura 8.

La figura 8 indica los valores de resistividad eléctrica observados en las celdas en el entorno de un punto de

inyección, en correspondencia a la medida ERT pre-tratamiento (tiempo T0, primera columna) y después observados en tiempo T1 (segunda columna) una vez realizada la inyección. En la tercera columna, se expresan las variaciones absolutas de la resistividad para cada celda. En el núcleo interno más cercano al punto de inyección se han observado importantes aumentos de resistividad, con variaciones de hasta el 50-100%, muy coherentes con los incrementos de las propiedades mecánicas observadas con los ensayos geotécnicos y detallados en el párrafo anterior: el aumento de resistividad es una consecuencia de la reducción de los vacíos y de la compactación del terreno. El progresivo alejamiento del punto de inyección pone en evidencia zonas de disminución de resistividad y este fenómeno puede ser causado por el efecto de alejamiento del agua de los poros como consecuencia de la expansión de la resina.

3. CONCLUSIONES Y DESARROLLOS FUTUROS

Gracias a un estudio multidisciplinar, la experimentación que se ha realizado ha permitido documentar las modalidades con las que se lleva a cabo el procedimiento de consolidación de terrenos a través de inyecciones de resinas expansivas y evaluar los volúmenes involucrados y la eficiencia del tratamiento en términos de aumentos de resistencia, rigidez y resistividad.

La observación de las paredes de la excavación ha proporcionado datos relativos a la distribución y propagación de las resinas inyectadas y, junto a las tomografías eléctricas 3D permiten una estimación de los volúmenes involucrados en el procedimiento.

Los ensayos geotécnicos in situ y en laboratorio han evidenciado como los terrenos cercanos a las zonas de las inyecciones aumentan sensiblemente tanto sus características de resistencia, como sus características de rigidez. Según quien ha redactado este informe, la contribución de estas inyecciones es dúplice: por un lado conllevan una reducción de los vacíos gracias a la expansión de la resina y por otro lado la presencia de la misma resina compacta de forma homogénea el terreno tratado.

Los modelos de resistividad eléctrica 3D permiten individuar el alcance de cada intervención de inyección y el consecuente aumento de resistividad, confirmando el proceso de compactación y de alejamiento de las aguas presentes.

Los resultados evidencian una potencialidad de integración de los estudios geotécnicos y geofísicos para llegar a la definición de un procedimiento geotécnico-geofísico que se pueda utilizar tanto en fase de proyecto, como en fase de verificación de las intervenciones de consolidación con resinas expansivas.

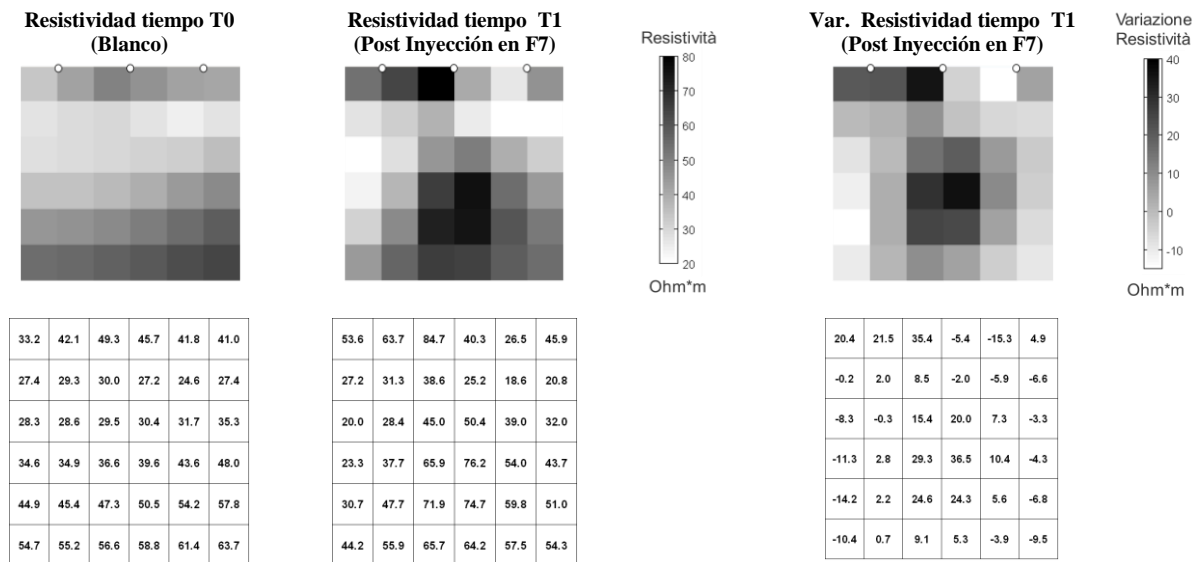


Figura 8. Detalle de las variaciones de resistividad eléctrica alrededor de un punto de inyección.

4. BIBLIOGRAFIA

- ASTM, American Society for testing and Materials, 1987. *Annual book of ASTM Standards. Soil and rock; building tones geotextiles - 04-08: D2487, D1556; D2167.*
- Apuani T., Beretta G.P., Pellegrini R. 2006. "Linee Guida per l'inertizzazione in situ dei suoli contaminati". n°12 - Provincia di Milano
- Fischanger, F., Morelli, G., LaBrecque, D. and Occhi, M, 2007. *Monitoring resin injections with 3D Electrical Resistivity Tomography (ERT) using surface and multi-borehole electrode arrays.* Proceedings of Symposium on the Application of Geophysics to Environmental and Engineering Problems (SAGEEP), Denver, Colorado (USA), April 1-5, 2007, 1226-1233.
- Morelli G., LaBrecque D.J., 1996. *Advances in ERT inverse modelling*, European Journal of Environmental and Engineering Geophysical Society, 1(2), 171-186.
- Robertson P.K., Campanella R.G., 1982. *Interpretation of Cone Penetration Tests. Part 1 and Part 2*, Soil Mechanics Series N. 60. British Columbia University - Vancouver, Canada.
- CNR, 1992 *Determinazione dei moduli di deformazione Md e Md' mediante prova di carico a doppio ciclo con piastra circolare* Bollettino Ufficiale (Norme tecniche) - anno XXVI n. 146.

EXTRACTO

EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA DE LAS INYECCIONES DE RESINAS EXPANSIVAS PARA LA CONSOLIDACIÓN DE TERRENOS A TRAVÉS DE PRUEBAS GEOTÉCNICAS Y DE LA TOMOGRAFÍA DE LA RESISTIVIDAD ELÉCTRICA 3D

Palabras Clave: tratamiento de consolidación del terreno, pruebas geotécnicas, Tomografía de la resistividad

eléctrica.

El aumento de asentamientos y movimientos de la huella de cimentación de los edificios puede ser causado por diferentes fenómenos.

Las cargas añadidas a un edificio y la falta de un mantenimiento periódico, sobre todo del sistema de drenaje pueden causar hinchamientos y el envejecimiento del terreno, empeorados por la ciclicidad de las estaciones que favorecen fenómenos alternados de sequía seguida por periodos de lluvias abundantes. El movimiento de pequeñas fracciones de terreno y los cambios de la cantidad de humedad presente afectan el equilibrio entre la cimentación y la capacidad de carga del terreno.

Los asentamientos verticales, causados tanto por los eventos naturales, como por la actividad humana, requieren siempre un estudio del estado del terreno bajo la cimentación para identificar las anomalías que han llevado a la inestabilidad y para poder planear una intervención de consolidación adecuada.

Geosec ha desarrollado un procedimiento para la consolidación del terreno basado en las inyecciones de resina expansiva bicomponente de poliuretano monitorizadas a través de pruebas geotécnicas tradicionales realizadas in situ y en laboratorio y de imágenes geofísicas del suelo. En particular la Tomografía de la Resistividad Eléctrica 3D se utiliza para obtener la imagen real tridimensional del terreno de cimentación. Antes, durante y después de las inyecciones.

Con esta finalidad, se preparó un campo de ensayos integrando estos dos métodos. Los parámetros de fuerza y deformabilidad del suelo han sido determinados gracias a ensayos in situ y en laboratorio, antes y después del tratamiento con inyecciones y los resultados han sido comparados con la distribución 3D de la resistividad obtenida con las pruebas ERT. Dichos resultados representan las habilidades del tratamiento con inyecciones y de las técnicas de monitorización. Se observan un importante aumento de capacidad de fuerza y

de deformabilidad. Este trabajo ayuda a determinar importantes, útiles para determinar la tipología y la
| procedimientos operativos e indicaciones para el proceso verificación de la intervención.
de consolidación con resinas y proporciona datos