

# CARACTERIZACIÓN GEOMECÁNICA DE UN ALUVIAL TRATADO CON LECHADAS A BASE DE MICROCEMENTO MEDIANTE INYECCIONES DE IMPREGNACIÓN

**Ignasi JARAUTA BRAGULAT**

INGENIERO INDUSTRIAL  
Director de Suministros y Servicios Tecnológicos, SCP (SUMSERT)

## **Introducción.**

En este artículo se describen los trabajos de investigación realizados para caracterizar geomecánicamente un terreno de origen aluvial tratado con inyecciones de lechadas a base de cemento y microcemento SPINOR A12. El tratamiento del aluvial, realizado en la zona del Vallés Oriental (provincia de Barcelona), tenía por objetivo poder realizar una excavación con total seguridad en las inmediaciones de una carretera, para el paso de una tubería de dos metros de diámetro, perteneciente a la sociedad ATLL (Aigües Ter Llobregat), bajo la misma sin cortar el tráfico [Figura 1].



**[Figura 1] Vista de la excavación y de la tubería una vez colocada.**

A la vista de los resultados de la excavación y el buen comportamiento del tratamiento, la sociedad SUMSERT, decidió realizar los trabajos de caracterización que se describen a continuación, motivada únicamente por el interés de seguir aumentando el conocimiento sobre este tipo de tratamientos, a través de la cuantificación de algunos de los parámetros más importantes involucrados, que en el futuro pueden ser de utilidad en otras aplicaciones y poder ofrecer así un servicio más completo a los posibles especificadores y/o contratistas.

## **Características del tratamiento.**

Las inyecciones se realizaron con la técnica del tubo manguito, empleando tubos metálicos para configurar una inyección de tipo armado. Los tubos se distribuyeron formando una "U" en planta en

el interior de la cual se hizo la excavación una vez tratado el terreno [Figuras 2 y 3]. Cada una de las tres zonas de tratamiento estaba integrada por cuatro filas de tubos manguitos. Se dispusieron tres válvulas de inyección por metro lineal de tubo tipo antirretorno. Las inyecciones de impregnación formaban parte de un tratamiento más amplio en el que también se incluía inyecciones con cemento convencional en una primera fase.

El tratamiento se realizó sin presencia de nivel freático.



**[Figura 2] Distribución de los tubos manguitos en la superficie a excavar contigua a la carretera.**



**[Figura 3] Vista de los trabajos de excavación para colocación de la tubería.**

Se procedió a realizar primero un confinamiento de la zona que sería objeto propiamente del tratamiento, mediante la inyección de cemento en todas las válvulas de los dos tubos más exteriores de cada banda; en los tubos interiores se inyectaron una de cada dos válvulas con cemento. Esta inyección era del tipo "clacage" en la cual, mediante fractura hidráulica se "rompe" el terreno para, por un lado, compactar el terreno por acción de la presión a la que se somete, y por otro, crear una porosidad mayor y rellenar con el aglomerante que le confiere mayor resistencia. Las válvulas se cerraban al alcanzar una presión máxima efectiva de  $5 \text{ kg/cm}^2$ . Los caudales empleados fueron de entre 5 y 10 l/min.

Una vez realizado el confinamiento se procedió a la inyección de lechada a base de microcemento Spinor A12 a través de las válvulas, para consolidar el terreno. La presión máxima de inyección y los caudales empleados fueron los mismos que para las lechadas a base de cemento convencional. Las válvulas antirretorno permitieron realizar inyecciones repetitivas, bajo la filosofía de ir inyectando poco caudal reincidiendo en el punto de inyección. En este sentido, la gestión de la inyección (presiones, caudales, dosificaciones y composición de lechada) en cada uno de los taladros fue muy cuidadosa para favorecer una correcta impregnación.

En la fase previa de confinamiento se emplearon lechadas a base de cemento tipo II 32,5, suministrado en sacos. Las relaciones agua/cemento variaron adaptándose a las propias necesidades de la actuación.

El microcemento empleado fue tipo SPINOR A12, suministrado en palets de 50 sacos de 25 kg. Las lechadas a base de este microcemento eran especialmente indicadas para el tratamiento por la finura del microcemento (formado por partículas de diámetro máximo 12 micras) y por sus propiedades, caracterizándose por: (1) una ausencia total de elementos contaminantes o agresivos con el medio ambiente; (2) una inyectabilidad muy superior a la de las lechadas clásicas; (3) unos límites de penetrabilidad próximos a los de las lechadas químicas; (4) la obtención de resistencias mecánicas elevadas en el terreno tratado y (5) resistencia a los terrenos y agentes agresivos.

Las lechadas de microcemento empleadas tenían relaciones agua/cemento de 3/1. Para alcanzar sus propiedades óptimas de inyectabilidad las lechadas de microcemento requieren la adición de un superplastificante dispersante que permite la separación de las partículas ultrafinas del ligante y evitan la formación de grumos que impedirían la penetración de la lechada en el terreno y reduce muy fuertemente el agua libre.

La zona fue tratada con unos 100 taladros de profundidad variable. La inclinación de los taladros se situó entre los 0 y 20°. En conjunto se totalizaron unas admisiones de 70 t de microcemento.

### **Características iniciales del terreno**

El terreno objeto de tratamiento y en el cual se realizaría la excavación de la zanja para la colocación de la tubería, presentaba una gran heterogeneidad, en lo que a su composición granulométrica se refiere, si bien el depósito en conjunto podía considerarse muy similar.

Desde un punto de vista genético, se trataba de sedimentos cuaternarios de origen continental (aluvial). Mayoritariamente se encontraba formado por depósitos de arenas de grano medio a grueso, color marrón, con algún contenido en finos y arenas con gravas de subangulosas a subredondeadas y naturaleza poligénica (calizas, cuarcitas, etc.). El terreno pudo identificarse claramente una vez abierta la excavación [Figura 4].

Aunque, como se ha indicado, el objetivo principal de los trabajos que se describen en este artículo era la caracterización geomecánica del terreno tratado, para poder disponer de una caracterización previa del terreno desde un punto de vista geotécnico y comparar la mejora de propiedades, SUMSERT encargó la realización de un sondeo a rotación, de cuatro metros de profundidad, y con recuperación continua de testigo.

El sondeo fue realizado en el mismo material aluvial, en una zona muy próxima a la zona tratada. A la profundidad de dos metros y en material aluvial, se tomó una muestra inalterada y seguidamente a ésta se realizó un ensayo SPT. Dada la naturaleza del terreno, la perforación del sondeo fue

ejecutada sin agua para reducir al máximo la alteración de las propiedades del mismo. El diámetro de perforación fue de 113 mm [Figura 5].



[Figura 4] *Detalle del terreno excavado.*

En lo que a características geomecánicas se refiere, si bien son escasos los datos que se obtuvieron, por las propias limitaciones de la investigación realizada, de forma general el terreno se puede caracterizar desde un punto de vista resistente por un valor  $N_{SPT}$  de 20 golpes, lo que supone una compacidad media.

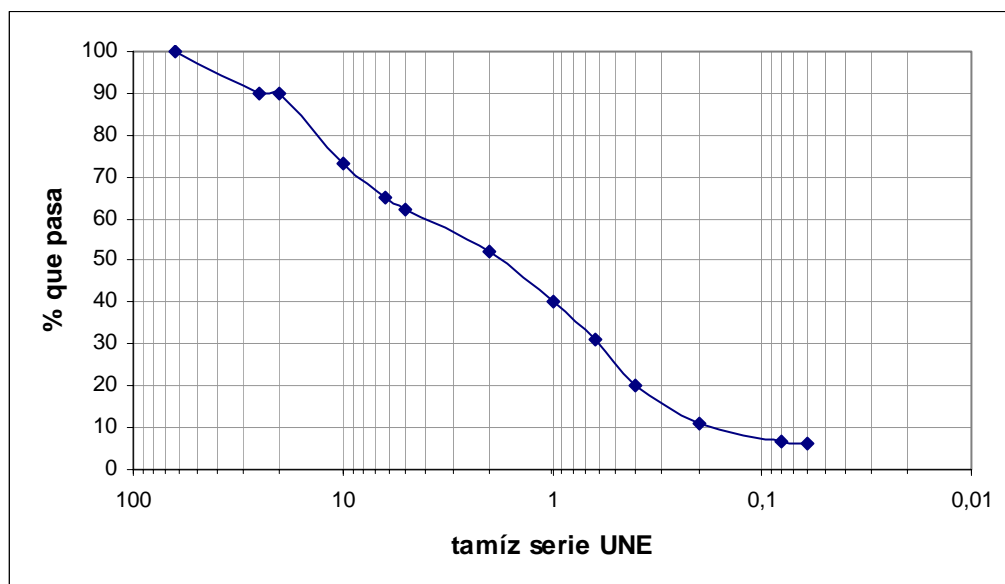




[Figura 5] *Material perforado en el sondeo de caracterización del terreno original.*

El material recuperado en la muestra inalterada y el SPT fueron ensayados en un laboratorio debidamente acreditado en los diferentes ámbitos. La curva granulométrica del depósito aluvial es la adjunta [Figura 6], en la que destacan los valores del 62 % del material que pasa por el tamiz 5UNE (arenas), el 20 % por el tamiz 0,4UNE (arenas finas) y el 6,8% por el tamiz 0,08UNE (limos y arcillas). Con las características del material puede considerarse, según ROM 0.5, un índice de poros de 0,30, un ángulo de rozamiento interno de 35° y un módulo de deformación drenado de 20 MPa.

Según la clasificación de Casagrande el material, sin plasticidad alguna, correspondería a la doble simbología SM-SP. La humedad natural se situaba entorno al 4%.



[Figura 6] *Curva granulométrica del material aluvial inyectado.*

### Trabajos para la caracterización del terreno tratado

Con el objetivo de recuperar muestras del terreno tratado que poder ensayar en laboratorio, se planteó la realización de otra perforación a rotación con recuperación continua de cuatro metros de profundidad en la zona que había sido inyectada con microcemento [Figura 7].



**[Figura 7] Ejecución de sondeo en la zona inyectada.**

Los resultados de este sondeo fueron muy dispares. El sondeo se perforó con diámetro de 113 mm e inicialmente en seco, para no alterar la muestra. Después de algo menos de dos metros de perforación aproximadamente y una vez llegados al material aluvial tratado, como resultado se obtuvo únicamente la recuperación de unos pocos centímetros de muestra [Figuras 8 y 9] y el desgaste de la corona de perforación (de widia), por no emplearse líquido de refrigeración durante el avance y por la dureza y características del material que se intentaba perforar. Seguidamente se realizó un ensayo SPT (a 2,00 m de profundidad) en el que se obtuvo rechazo.



**[Figura 8] Material recuperado hasta los tres metros de profundidad, en el sondeo perforado en la zona tratada.**

Llegado este punto, se intentó recuperar alguna muestra perforando con el mínimo de agua de refrigeración posible que permitía la bomba del equipo de sondeo, con corona de diamante y empleando tomamuestras de pared doble. Sin embargo, el material durante la inyección de agua en

el sondeo era lavado, recuperándose por la boca del sondeo el agua de refrigeración con una carga de sedimento y teñida de color verdoso (indicador de la disolución del microcemento SPINOR A12, el cual una vez fraguado presenta este color). El material recuperado era escaso y con fracciones lavadas.



[Figura 9] *Detalle del tipo de muestra de material inyectado que se consiguió recuperar.*

El material no se podía recuperar porque su disposición durante la inyección (como pudo observarse en los taludes excavados) es a formar finas lajas intercaladas entre el material aluvial uniéndolo [Figura 10]. Durante la perforación el agua va lavando el material aluvial no cementado dejando libres las lajas de microcemento. Indicar que las paredes del sondeo se mantuvieron estables en toda su profundidad sin entubación, aún con el uso de agua de perforación.



[Figura 10] *Detalle de la forma de inclusión del microcemento en el aluvial.*

Se realizó un nuevo ensayo SPT a 2,40 m de profundidad, obteniéndose nuevamente rechazo. El material que se recuperó presentaba un contenido considerable en microcemento [Figura 11].



**[Figura 11] Detalle de la forma de inclusión del microcimento en el aluvial.**

Ante la imposibilidad de conseguir en el sondeo una muestra inalterada de terreno tratado para ser ensayada en laboratorio, se optó por coger una muestra en bloque de dimensiones adecuadas para tratar de tallarla en el laboratorio.

A partir de la muestra en bloque, y con un trabajo cuidadoso, en el laboratorio, se consiguió obtener una única probeta para ensayar de dimensiones: 9,86 cm de diámetro y 17,20 cm de altura.

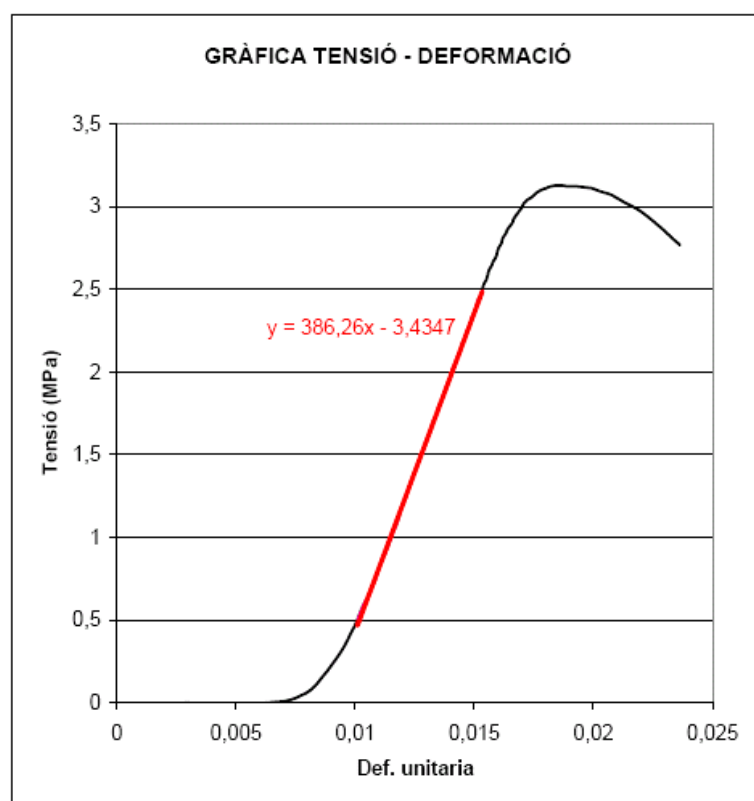


**[Figura 12] Probeta obtenida a partir de la muestra en bloque, antes y después de ensayada.**

Se determinó la densidad natural del material de la muestra en bloque obteniéndose un valor de  $1,70 \text{ g/cm}^3$ .

La probeta fue sometida a un ensayo de compresión simple según Norma NLT-305/97 para materiales tratados con aglomerantes hidráulicos [Figura 12], obteniéndose una tensión máxima de rotura de  $3,15 \text{ MPa}$  y un módulo de deformación de  $386 \text{ MPa}$ . El módulo de deformación medio se ha determinado como el valor de la pendiente de la curva de compresión en la zona elástica, según método de cálculo de la Norma UNE 22.950-3/90. La deformación unitaria ha sido calculada como el desplazamiento del plato inferior de la prensa, dividido por la altura de la probeta incluido el refrentado de la misma [Figura 13]. La forma de rotura de la probeta es característica de testigos de roca o mortero.

Los valores obtenidos sirven para poner de manifiesto la efectividad del tratamiento y la capacidad de transformación de un suelo arenoso casi sin finos, por simple impregnación, en una especie de mortero. No obstante, a pesar del importante incremento en el valor del módulo de deformación obtenido, el resultado de  $386 \text{ MPa}$  no se considera muy elevado debido a que las lechadas empleadas en los trabajos no tenían un contenido muy alto en microcemento (relación a/c de 3/1, cuando valores normales en tratamientos de este tipo son relaciones a/c de 2/1 a 1/1).



[Figura 13] *Gráfica tensión-deformación obtenida del ensayo de compresión simple realizado sobre la muestra de material aluvial inyectado con microcemento SPINOR A12.*

Por último, se realizó una determinación del contenido en cemento de la muestra en bloque según Norma ASTM C 1087/8. El ensayo fue realizado en el laboratorio del Departamento de Ingeniería de la Construcción de la Universidad Politécnica de Cataluña (UPC).

El resultado del ensayo fue que la muestra presentaba un contenido de 3,2%, si bien el contenido de cemento fue analizado considerando en el laboratorio todo el cemento como de tipo I. Este aspecto se ha corregido en función de las características del tratamiento, el cual debe suponerse realizado en un 50% con cemento tipo II bastante adicionado y el otro 50% con Spinor A12. En el primer caso, el contenido de clinker es de un 70% y en el del microcemento del 30%. El contenido

en cemento de la muestra ensayada se ha corregido en  $(0,5 \times 95/70 + 0,5 \times 95/30) = 2,26$ . Así pues, el contenido final de la muestra en cemento es de  $3,2\% \times 2,26 = 7,23\%$ .

## **Conclusiones**

Las inyecciones alcanzaron sus objetivos, impregnar y consolidar el terreno para poder ser excavado con total seguridad y de tal forma que la ocupación de la zanja abierta para la colocación de la tubería fuera la mínima. La instalación pudo realizarse al pie de la carretera sin necesidad de afectar al tráfico.

En la zona inyectada, la excavación pudo realizarse con taludes prácticamente verticales y con una altura de hasta 10 metros.

Los trabajos han puesto de manifiesto una vez más la alta capacidad de penetración de las lechadas a base de microcemento SPINOR A12 y la idoneidad de las mismas para la realización de tratamientos de consolidación y mejora en terrenos de tipo aluvial con granulometría diversa.

Los ensayos de penetración realizados después del tratamiento han puesto de manifiesto igualmente la efectividad del mismo. Se ha observado que el terreno ha pasado de presentar un valor de golpeo en el ensayo SPT de unos 20 golpes a obtenerse rechazo debido al aumento de resistencia.

A partir del ensayo de una muestra de material inyectado tallada en laboratorio se ha comprobado el importante aumento del valor del módulo de resistencia del terreno que se consigue con la inyección (casi 20 veces mayor). Dado que las lechadas que se emplearon en el tratamiento fueron del tipo medio-pobre por la relación a/c empleada de 3/1, estos resultados pueden considerarse ampliamente mejorables con lechadas más ricas en microcemento.

Por último, destacar la importancia que tiene la ejecución en los resultados de un tratamiento de este tipo, siendo claramente favorecedora una metodología basada en la inyección de caudales pequeños reiterados en un mismo punto hasta obtener la presión de cierre.