

# Mejora de las zonas de transición para los ferrocarriles de alta velocidad (TAV)

ANTONIO SANTOS MORENO (\*); VICENTE CUÉLLAR MIRASOL (\*)

**RESUMEN** Con el fin de obtener zonas de transición con una resistencia al corte y características de resistencia determinadas en estructuras de tierra ya construidas se puede inyectar el terreno con mezclas estables de cemento mediante la técnica de fracturación hidráulica a través de tubos manguito. En el Laboratorio de Geotecnia (CEDEX) se están efectuando investigaciones con el fin de encontrar la correlación entre los parámetros básicos de la inyección (presión de inyección y distancia entre los sondeos) y los parámetros mecánicos de los materiales tratados. Este artículo presenta algunas de las pautas del estudio.

## IMPROVEMENT OF TRANSITION ZONES FOR HIGH VELOCITY RAILROAD LINES

**ABSTRACT** For obtaining transition zones with predetermined shear strength and deformation characteristics in already-built earth structures the technique of hydraulic fracture grouting through sleeve pipes, using stable cement based mixtures is of application. The Laboratorio de Geotecnia of CEDEX is currently involved in research that aims to correlate the basic parameters of the grouting operations (grouting pressure and distance between grouting holes) to the mechanical parameters of the treated material. In this communication some of the guidelines of this study are presented.

**Palabras clave:** Ferrocarril; Zonas de transición; Fracturación hidráulica; Ensayos in situ.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las estructuras que se encuentran enterradas por debajo de los rellenos de los terraplenes pueden causar asientos diferenciales que hacen necesaria la interrupción de los servicios de transporte, sobre todo cuando se trata de asientos en los terraplenes construidos para soporte de los trenes de alta velocidad (TAV). Existe el mismo tipo de problema en los rellenos utilizados en los estribos de acceso a los puentes.

En algunas publicaciones (Soriano et al. 1991; Soriano, 1994) se ha intentado dar un criterio para estimar los asientos diferenciales admisibles en líneas de alta velocidad a través de las recomendaciones del ferrocarril (es decir a través del radio mínimo aceptable de la proyección vertical de la línea del carril). Para un radio mínimo de 50.000 m los asientos diferenciales que se obtienen en tramos de 20 a 40 m son tan sumamente bajos (de 1/5.000 a 1/2.500) que sólo se podría conseguir que el perfil de la línea de carril se mantuviera dentro de límites aceptables mediante la aplicación de balasteos a intervalos de tiempo muy reducidos, a pesar de la utilización de zonas amplias de transición para las estructuras enterradas o, en el caso de los estribos de los puentes, del uso de losas de transición.

El resultado de dichos trabajos es un aumento local del espesor del balasto, que origina "bolsas de gravas" en la parte superior de las zonas de transición del terraplén que,

a su vez, han de corregirse para que no constituyan bolsones de agua retenida, que podrían afectar a los módulos de deformación efectivos del relleno, tanto dinámicos como estáticos.

Mediante la técnica de fracturación hidráulica, la inyección de mezclas estables de cemento, a través de tubos manguito, puede conseguir mejoras importantes y selectivas en cuanto a las características deformacionales de los suelos naturales y los rellenos, independientemente de su distribución granulométrica. Por tanto, esta técnica podría constituir un medio de gran valor en la mejora del comportamiento de aquellas zonas de transición de los rellenos de terraplenes y estribos, reduciendo considerablemente la necesidad de corregir los asientos con balasteos y los efectos secundarios asociados a dichos trabajos.

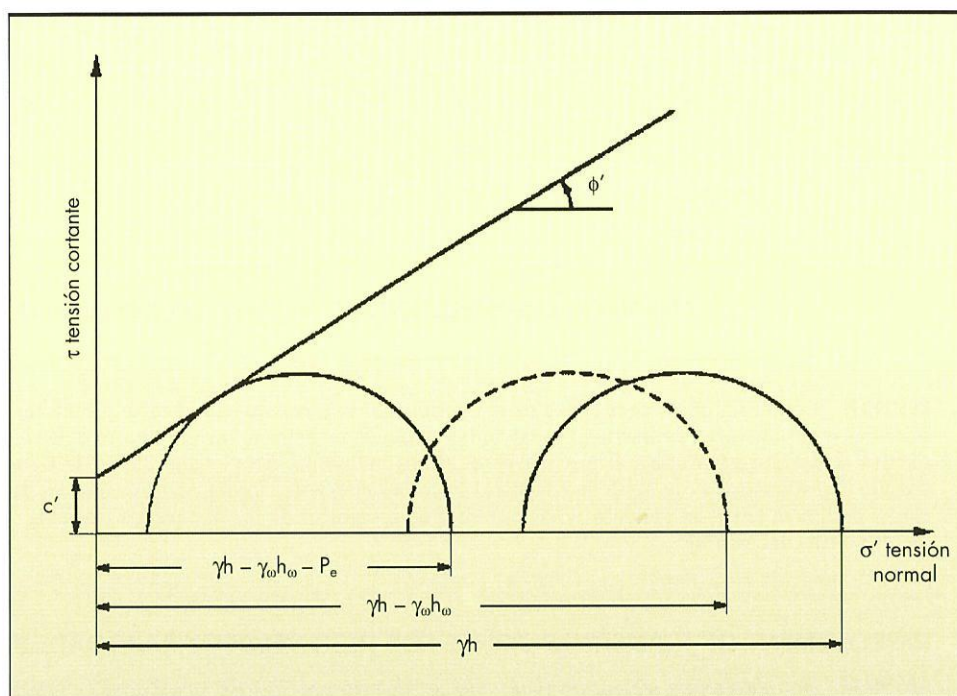
## 2. MEJORA DE LA RESISTENCIA AL CORTE MEDIANTE LA FRACTURACIÓN HIDRÁULICA CON INYECCIÓN DE LECHADA ESTABLE DE CEMENTO

En el pasado, cuando inyectar suelos era sinónimo de impregnación, Morgenstern y Vaughan (1963) desarrollaron la fórmula siguiente, que da la presión máxima permitida de inyección  $P_e$ , en términos de los parámetros de la resistencia al corte  $c'$  y  $\phi'$  de los suelos no alterados (Véase la figura 1).

$$P_e = \frac{(\gamma h - \gamma_w h_w)(1 + K_0)}{2} - \frac{(\gamma h - \gamma_w h_w)(1 - K_0)}{2 \sin \phi'} + c' \cot \phi'$$

(\*) Laboratorio de Geotecnia, CEDEX (Ministerio de Fomento). España.

**FIGURA 1.** Mecanismo de fracturación hidráulica considerado por Morgenstern y Vaughan (1963).



En la fórmula anterior

- $\gamma$  indica la densidad aparente del material por encima del nivel donde se efectuará la inyección.
- $h$  y  $h_w$  indican respectivamente el espesor de material y el nivel piezométrico de las aguas subterráneas por encima de dicho nivel.
- $K_0$  es el coeficiente de empuje al reposo.

Suponiendo que  $P_0$  sea la presión final en una operación de inyección cuyo fin es mejorar las características mecánicas del suelo mediante la fracturación hidráulica, su valor vendría dado, utilizando el razonamiento previamente realizado por la fórmula anterior en la que ahora  $c'$  y  $\phi'$  representarían los parámetros resistentes del suelo inyectado.

Si introduciendo una nueva variable  $p = p_0 + \gamma_w h_w$ , se aplica dicha fórmula tal y como sugieren Morgenstern y Vaughan (1963) en suelos sedimentarios en los que los planos de estratificación constituyen planos de debilidad se obtiene la siguiente expresión simplificada que relaciona la presión final de inyección con los parámetros efectivos de la resistencia al corte de los suelos inyectados:

$$\frac{p}{\gamma h} = 1 + \frac{c'}{\gamma h} \cot \phi'$$

En dicha expresión se puede considerar la presión final de inyección  $p$  como un parámetro básico para evaluar la resistencia final del terreno inyectado.

### 3. CONTROL DE LA MEJORA DE LOS MÓDULOS DE DEFORMACIÓN ESTÁTICOS Y DINÁMICOS MEDIANTE INYECCIÓN POR FRACTURACIÓN HIDRÁULICA

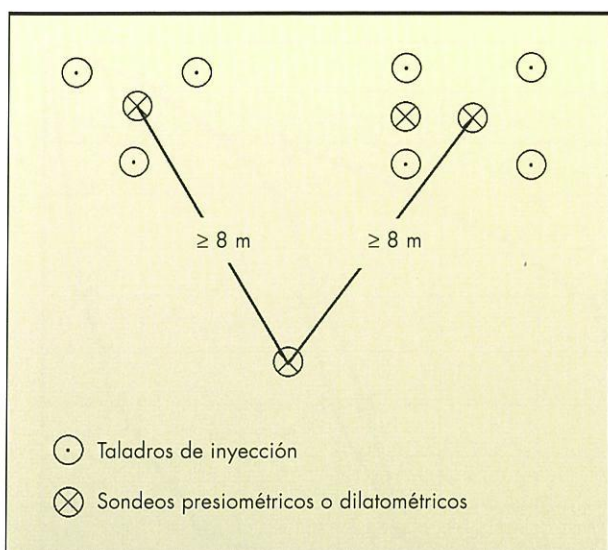
Como se puede apreciar en la figura 2, la estructura de un suelo mejorado mediante técnicas de inyección por fractura-

ción hidráulica no es muy apta para obtener muestras intactas que se utilicen en los ensayos de laboratorio, dado que es difícil obtener muestras representativas de sus dimensiones verdaderas, y porque este efecto escala puede influir en gran medida sobre el comportamiento observado en los ensayos de laboratorio.

Con el fin de comprobar la mejora experimentada por el terreno una vez tratado, pueden efectuarse ensayos dilatómétricos y presiométricos (ver figura 3) que permitan evaluar directamente las características deformacionales de un suelo antes y después de la inyección, en las zonas de tratamiento. La aplicación de la técnica sísmica "cross-hole" permitió a su vez establecer los módulos dinámicos de un suelo, antes y después de su tratamiento mediante inyección. Con el fin de evitar que los tubos manguito dentro de los sondeos influyan en la determinación de estos



**FIGURA 2.** Inclusiones de cemento obtenidas con presiones de inyección bajas (menos de 500 Kpa).



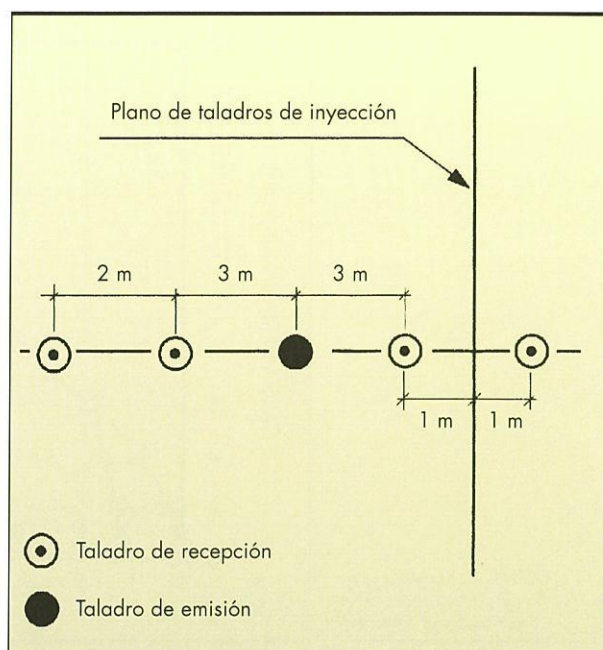
**FIGURA 3.** Disposición para la determinación in situ de los parámetros mecánicos estáticos del suelo tratado y sin tratar.

módulos, es imprescindible propagar las ondas sísmicas en una dirección normal a los planos de los sondeos de inyección (ver figura 4).

#### 4. ENSAYOS DE CARGA ESPECIALES EFECTUADOS POR EL LABORATORIO DE GEOTECNIA DEL CEDEX SOBRE SUELOS INYECTADOS Y SIN INYECTAR

En la figura 5 se muestran los equipos utilizados en los ensayos de carga especiales llevados a cabo in situ para comprobar tanto los efectos de inyección en el suelo como los efectos del bulonado ejercido por los tubos manguito en el interior del terreno.

En las figuras 6 y 7, se puede apreciar los resultados de los dos ensayos de carga efectuados sobre zapatas de  $2 \text{ m} \times 2 \text{ m}$  (y 1,5 m de espesor), construidas a una profundidad de 1,5 m, tanto en suelo margoso sin tratar como inyectado, respectivamente.



**FIGURA 4.** Disposición para la determinación in situ de los módulos elásticos de deformación reducida en los suelos tratados y sin tratar, utilizando la técnica cross-hole.

Se trataba de un suelo margoso con el 98% de partículas pasando por el tamiz 200 de la ASTM, con un Límite Líquido de 37, un Límite Plástico de 18 y una resistencia a la compresión simple superior a 500 kPa.

Los resultados medidos en la figura 7 se obtuvieron una vez tratado dicho material hasta una profundidad de 6 m por debajo de la zapata.

Comparando ambas figuras puede observarse cómo los asentamientos obtenidos en el terreno tratado son un orden de magnitud inferiores a los determinados en el terreno sin tratar y cómo el terreno inyectado con los tubos manguitos alojados en su interior tiene un comportamiento prácticamente elástico hasta presiones verticales de  $20 \text{ kp/cm}^2$ .



**FIGURA 5.** Disposición de los ensayos de carga especiales efectuados por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX para determinar el grado de mejora en suelos margosos después de realizar inyecciones por fracturación hidráulica.

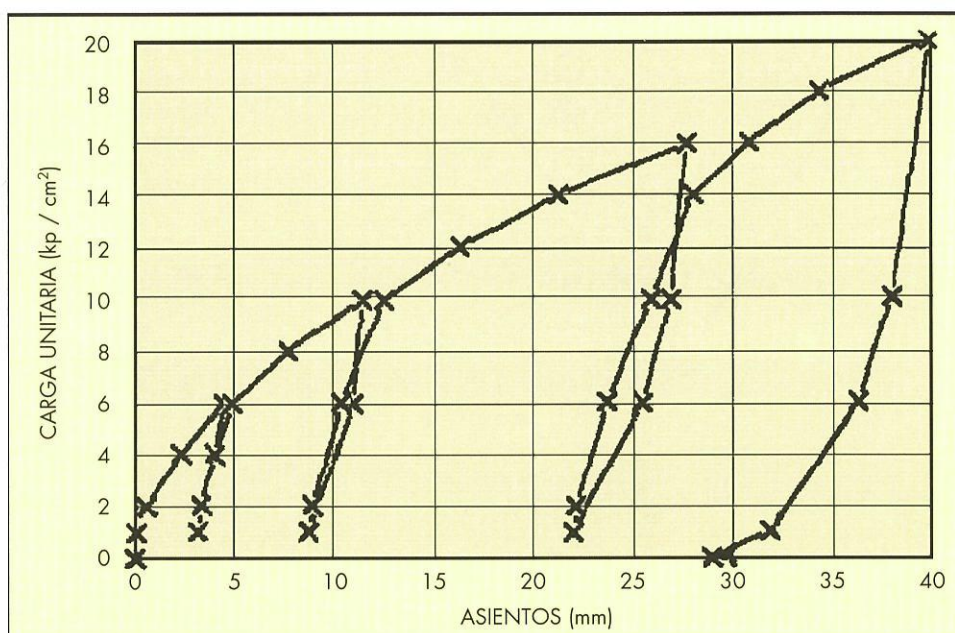


FIGURA 6. Resultados del ensayo de carga realizado sobre suelo margoso sin tratar.

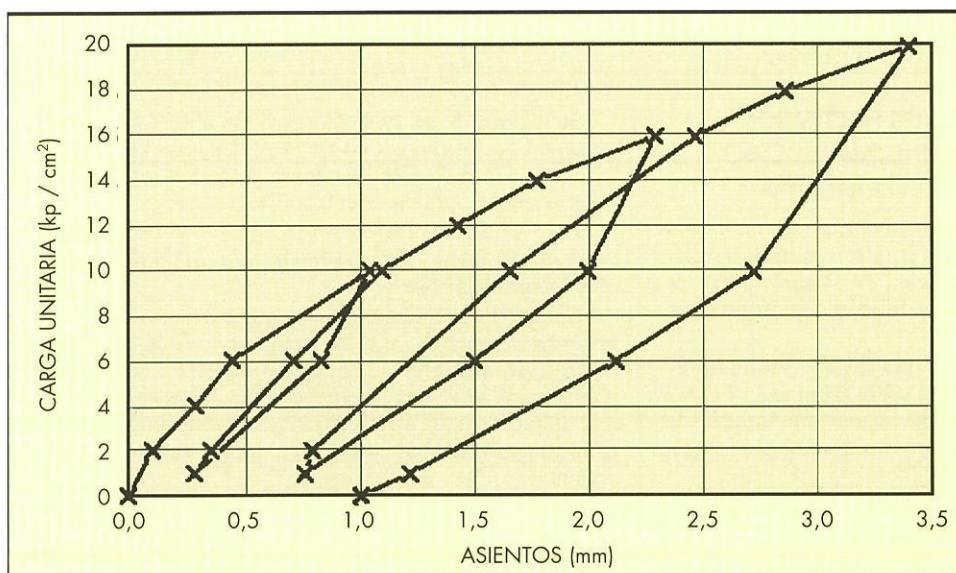


FIGURA 7. Resultados del ensayo de carga realizado sobre suelo margoso inyectado.

## 5. CONCLUSIONES

Según las investigaciones actualmente realizadas por el Laboratorio de Geotecnia del CEDEX se puede utilizar la inyección de mezclas estables de cemento a través de tubos manguito, con un control permanente sobre los movimientos superficiales, y la velocidad y la presión de inyección, para mejorar la resistencia al corte y los parámetros de deformación estática y dinámica en estructuras de tierra ya construidas, hasta alcanzar valores límite previamente establecidos. Este tipo de tratamiento puede utilizarse para crear zonas de transición tanto para estructuras enterradas como para acceso a obras de fábrica. Tiene además la ventaja de que una vez definido geométricamente el "sólido" a inyectar, se pueden perforar los sondeos y aplicar la mezcla de inyección en terraplenes

o estribos lateralmente, sin ocasionar ningún tipo de trastorno al tráfico ferroviario.

## REFERENCIAS

- MORGENSTERN, N. R. & VAUGHAN, P. R. (1963). Some Observations on Allowable Grouting Pressures. Grouts and Drilling Muds in Engineering Practice. Institution of Civil Engineers, *Butterworths*, Londres.
- SORIANO, A.; SERRANO, C.; REIN, J. A.; SÁNCHEZ, F. J., (1991). Transition Wedges for High Velocity Railroad Structures. Proc. Tenth European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering. Florence.
- SORIANO, A. (1994). Los terraplenes del tren AVE, Madrid-Sevilla. Curso sobre Estructuras de Tierra. CEDEX (España) - LNEC (Portugal). Madrid.