

## Tratamiento de consolidación de terraplén en el PK 208/100 a 208/200 de la línea Calatayud-Valencia mediante inyecciones de fracturación hidráulica con lechada estable de cemento, a través de tubos manguito

### *Embankment compacting treatment in section 208/100 - 208/200 of the Calatayud-Valencia line by means of injections of hydraulic fracturing with stable cement grout through sleeve tubes*

José Manuel López Moreno  
Obras y Proyectos Geotécnicos S.L.

#### Resumen

ADIF adjudicó el proyecto de CONSOLIDACIÓN Y ESTABILIZACIÓN DE TERRAPLÉN FERROVIARIO ENTRE LOS PP.KK 208/100 Y 208/200, LÍNEA CALATAYUD – VALENCIA. TRAYECTO BARRACAS – MASADAS BLANCAS, a la empresa constructora AZVI. El tipo de circulación que transita por dicha línea incluye tanto trenes de viajeros como de mercancías, ocasionando estos últimos, debido a la baja frecuencia de sus acciones, un deterioro mayor en su nivelación y consecuentemente la necesidad periódica de aportación de balasto. El problema descrito se abordó con un método de consolidación del terraplén por medio de inyecciones de fracturación hidráulica a través de tubos manguito (inyecciones armadas), cuya realización se encargó a la empresa especializada Obras y Proyectos Geotécnicos, S.L. (OPG), en agosto de 2011. Al finalizar los trabajos, se realizaron ensayos siguiendo el método Cross-hole, para cuantificar la mejora alcanzada, proporcionando velocidades de onda de cortante  $V_s$  en el prisma de terreno tratado, por encima de los 400 m/s, como definía el proyecto.

Cabe señalar que este procedimiento se había aplicado en 2005, dentro del proyecto europeo Supertrack, al acceso sur del viaducto de Amposta (Tarragona). En esta primera aplicación del método intervino el mismo equipo profesional de OPG. La aplicación cumplió perfectamente la condición de conservar la vía en situación de rodadura confortable (movimientos del carril no superiores a 3 mm en 5 m), habiéndose mantenido durante las inyecciones del subbalasto, capa de forma y terraplén, hasta 7 m de profundidad, las velocidades de operación de los trenes (mercancías y viajeros), entre ellos, el paso del Euromed a 200 km/h.

Palabras clave: Cuñas de transición, inyecciones armadas, mantenimiento velocidades de servicio, terraplén, tubo de manguitos, circulación, control, Barracas - Masadas Blancas.

#### Abstract

*The consolidation and stabilization of the embankment located in the railway line CALATAYUD-VALENCIA, at the section between P.K. 208/100 AND P.K. 208/200 (within BARRACAS – MASADAS BLANCAS sector) was assigned to AZVI as general contractor. The transit in this line includes trains for the transportation of passengers and freight. The latter, because of their lower frequency of actions, gave rise to sizeable deformations of the track, requiring frequent corrections of ballast thickness, for achieving its adequate levelling. The problem was solved using hydraulic fracture grouting, through sleeve pipes, that was performed by Obras y Proyectos Geotécnicos, S.L. (OPG), specialized firm subcontracted by AZVI. The control of the improvement achieved was effected by obtaining the values of  $V_s$  (velocity of shear waves) within the grouted volume of soil, using the cross-hole technique. All the values obtained for  $V_s$  were higher than 400 m/s.*

*It has to be pointed out, that the professional team of OPG in charge of the grouting improvement was the same that, through the use of the same technique had improved, in 2005, the transition zone to the southern abutment of the railway bridge over the Ebro river at Amposta (Tarragona). This job was part of the Spanish contribution to the European Supertrack Project, and it was carried out simultaneously with the railway traffic (passenger and freight trains) operating at its normal speed. The passenger trains included the Euromed, which operated at 200 km/h as the track structure (below the ballast layer) and the underlying embankment were being grouted down to a 7 m maximum depth, under the requirement of comfortable operation (movements of rail less than 3 mm in 5 m length).*

*Keywords: Transition blocks, reinforced grouting, maintenance of cruising speeds, embankment, sleeve tube, train operation, train control, Barracas - Masadas Blancas.*

## **1. Introducción**

En este estudio de síntesis, vamos a contemplar los trabajos de consolidación del terraplén con el fin de reducir los trabajos de mantenimiento de la vía en el tramo de referencia.

ADIF adjudicó el proyecto de CONSOLIDACIÓN Y ESTABILIZACIÓN DE TERRAPLÉN FERROVIARIO ENTRE LOS PP.KK 208/100 Y 208/200, LÍNEA CALATAYUD – VALENCIA. TRAYECTO BARRACAS – MASADAS BLANCAS a la empresa constructora AZVI, que a su vez subcontrató a la empresa especialista OBRAS Y PROYECTOS GEOTÉCNICOS, S.L., para la realización de los trabajos de consolidación objeto de este estudio.

Las características mecánicas del tipo de circulación que transita por dicha línea, con tráfico de viajeros como de mercancías, son bien distintas, siendo estos últimos los que producen las frecuencias más bajas, y por ello, los que más afectan a la estructura de la vía, así como una defectuosa ejecución del terraplén, ocasionaban un deterioro importante en la nivelación de la vía y subsiguientemente una necesidad periódica de aportación de balasto. Al ir repitiéndose este fenómeno e ir recargando con un mayor peso la plataforma de vía empeoraban todavía más los efectos sobre la misma.

A la vista de lo anterior, se tomó la decisión de resolver la base del problema del terraplén con un método que permitiera su consolidación.

Entre los métodos presentados a la Administración, se eligió como el más idóneo, la consolidación por inyecciones de fracturación hidráulica con lechada estable de cemento a través de tubos manguito (inyecciones armadas), aplicadas desde una bancada de tierra adosada lateralmente, por las siguientes razones:

1. Experiencia muy positiva de consolidación de terraplén con este mismo sistema, en el acceso sur al Viaducto sobre el Ebro en Amposta, en la línea Barcelona-Valencia con tráfico mixto de Euromed (a 200 km/h) y mercancías.
2. Creación de una estructura reticular en el terraplén sin “puntos duros” y con una capacidad portante uniforme hasta alcanzar la necesaria profundidad que asegure el apoyo del tratamiento.
3. No interrumpen el tráfico ferroviario en ningún momento ya que los trabajos se realizan desde la bancada de tierra adosada al terraplén.
4. En todo momento se controla la nivelación de la vía, pues el proceso de mejora del terreno permite asegurar que los movimientos inducidos en la vía sean en todo momento inferiores a 3 mm en 5 m.
5. Se controla en cada fase de inyección los caudales y presiones en cada uno de los manguitos, así como las viscosidades desde la mezcla inyectada.
6. Finalizados los trabajos, se comprueba la eficacia del tratamiento realizado por métodos geofísicos, deduciendo el módulo de elasticidad del terreno tratado a partir de la velocidad de propagación  $V_s$  en m/s de las ondas de cortante.

A este respecto cabe señalar que en el caso del acceso sur al Viaducto de Amposta, por tratarse de una prueba del método, integrada en el proyecto Europeo SUPERTRACK, se contrastaron las medidas de velocidades  $V_s$  antes y después del tratamiento, con la medida directa, con láser, de las deformaciones de los carriles bajo el tránsito ferroviario. Se apreció así no solo una concordancia excelente entre las estimaciones de módulos de deformación por ambos métodos, sino además que, en la zona de terraplén tratada, se cumplía en todo momento la condición de tránsito confortable (deformaciones de carril inferiores a 3 mm en 5 m).

En apartados sucesivos se presenta un resumen del protocolo seguido para la ejecución de las inyecciones armadas, una serie de fotografías de los trabajos de campo y, finalmente, los resultados obtenidos en las medidas de propagación de ondas  $V_s$ , por el método Cross-hole, que permiten apreciar el grado de mejora del terraplén conseguido en su tratamiento.

Cabe mencionar que, durante la ejecución de los trabajos del tramo Barracas- Masadas Blancas y debido a la heterogeneidad del terreno en zonas muy localizadas, en el que existían huecos de gran tamaño, fue necesario hacer, una primera inyección con mortero para el relleno de los mismos y una segunda inyección con lechada de cemento-bentonita para efectuar la mejora por fracturación hidráulica del terreno.

## **2. Protocolo seguido para la ejecución de las inyecciones armadas**

### **A. Fracturación hidráulica del terreno**

Esta fracturación se lleva a cabo en forma controlada, de modo que las deformaciones se escalonen. Este proceso permite el tratamiento con mezclas estables a base de cemento para suelos cuya textura impediría la impregnación incluso por mezclas químicas de baja viscosidad. La referida rotura hidráulica se produce con volúmenes de lechada aplicados a través de puntos de inyección -protegidos por manguitos de goma- dispuestos en tubos de acero, con separación no superior a 0,50 metros entre puntos de inyección consecutivos de un mismo tubo. Estos puntos de inyección permiten la repetición del tratamiento cuantas veces se desee después de haber fraguado las mezclas anteriormente aplicadas, así como también la dosificación -en cada fase de inyección- del volumen y caudal empleados, lo que favorece un control muy preciso de las deformaciones inducidas en el subsuelo.

### **B. Consolidación del terreno por presión y estructuración**

La regulación del caudal de inyección forzado por rotura del terreno permite la aplicación de presiones “estáticas” crecientes, hasta la presión última de cierre de cada manguito que se prefija en proyecto. Estas presiones producen la consolidación de los pequeños dominios de terreno (de dimensión centimétrica) comprendidos entre las lenguas de lechada. En los suelos arcillosos se puede apreciar este efecto de consolidación, dado que en perforaciones de alivio de presiones intersticiales -intermedias a las de inyección- se registra durante el tratamiento una afluencia marcada de agua, la que cesa cuando se produce el fraguado de la mezcla inyectada. El resultado de este proceso consiste en la inclusión en el terreno de un esqueleto de lenguas de cemento endurecidas (resistencia de más de 40 kg/cm<sup>2</sup> a los 28 días en probetas de densidad igual a la inicial de la lechada, lógicamente muy superior en las inclusiones densificadas del terreno), entre las cuales se aprisiona un suelo consolidado que si se tratara de arcilla, al consolidarla a tan sólo 5 kg/cm<sup>2</sup> tendría -según la relación de Skempton- una cohesión aparente superior a 1 kg/cm<sup>2</sup>.

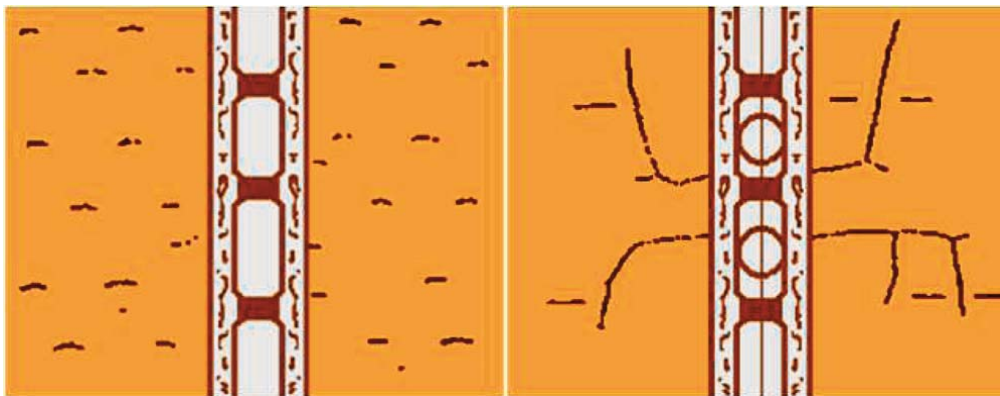
### **C. Armado del terreno tratado por los tubos de inyección**

Los tubos de acero del tratamiento quedan -al final del mismo- íntimamente asociados al volumen del terreno tratado. La disposición de los tubos puede prefijarse en abanico, de modo que la máxima distancia entre tubos dentro del volumen del suelo a tratar sea siempre inferior a dos veces el radio de acción de la inyección. Este último se ha contrastado repetidamente en suelos de naturaleza muy diversa (gravas, arenas, arcillas) mediante el examen directo “in situ” (excavaciones de suelo tratado) verificándose que la distancia del eje del taladro de tratamiento al borde de la zona (en la que la distribución de lenguas de lechada es masiva) resulta siempre superior a las previsiones, pero en forma mucho más dependiente de la resistencia del terreno y de las presiones de inyección que de la textura misma -más o menos fina- del suelo; circunstancia previsible por tratarse -como ya se ha señalado- de un tratamiento de rotura y consolidación, no de impregnación del suelo.

La distribución de los taladros persigue –complementariamente- el que los bulones (que en definitiva constituyen los tubos de inyección y cuya capacidad mecánica se puede reforzar en los casos precisos por introducción final de un redondo de acero en el interior del tubo) sirvan de elementos de cosido para aquellas superficies potenciales de deslizamiento del terreno -por acción de las cargas que lo solicitan- asegurando así el comportamiento mecánico necesario del suelo tratado.

Las presiones de tratamiento se ajustan -en general- a patrones sancionados por la práctica y recogidos en la literatura técnica. **En Europa se acepta habitualmente incrementar linealmente la presión de tratamiento en función de la profundidad. En nuestra experiencia, este aumento lineal puede conducir a heterogeneidades de la zona tratada, especialmente en la parte superior donde se concentran las cargas de cimentación. Por este motivo, se uniformizan más las presiones -incrementándolas en la zona superficial y reduciéndolas algo en la zona profunda-, de modo que se “precarga” el terreno de forma mucho más uniforme.**

### INYECCIÓN DEL TERRENO POR FASES

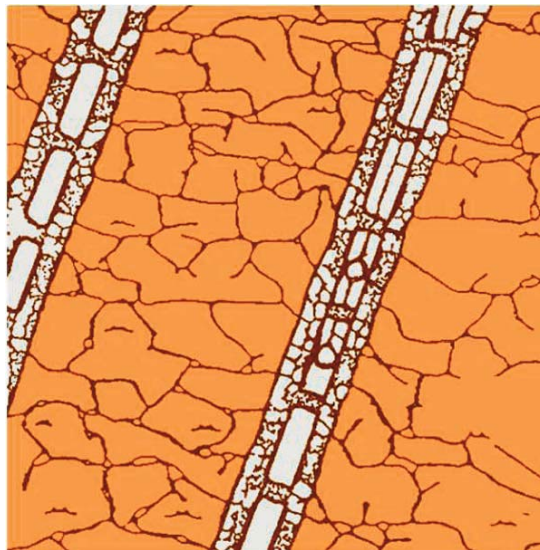


A la izquierda, estado de partida del terreno con la instalación del tubo manguito. A la derecha, presiones horizontales mínimas, creación de lenguas de inyección verticales.



A la izquierda, cambio del estado tensional del terreno, lenguas de inyección horizontales. A la derecha, continuación de la inyección.

### Transformación del estado mecánico inicial



#### D. Condiciones de aceptación en obra de las inyecciones armadas

Una vez finalizada la inyección del terreno por cada tubo manguito, el contratista lo comunica a la Dirección Facultativa y deja sin cementar interiormente el tubo de tratamiento correspondiente, con el fin de poder hacer la comprobación de que se han alcanzado las profundidades y condiciones de presión de cierre previstas, en los manguitos que dicha Dirección Facultativa decida, confrontándolas con las prefijadas en el proyecto y con las que se tengan en los partes de inyección confeccionados en obra. En éstos deben figurar, la profundidad, las presiones de apertura de cada manguito, y la presión estática de cierre del proceso a nivel del mismo, así como el volumen inyectado en cada una de las fases.

#### 3. Control del tratamiento mediante la determinación de velocidades $V_s$ por el método cross-hole

Las figuras 1 y 2 adjuntas, reflejan la localización, en planta y alzado, de las secciones de medida de ondas  $V_s$  y los resultados obtenidos. En estos últimos, los puntos de medida se definen por la distancia de los mismos a la boca de cada tubo, por lo que su localización ha de establecerse en los perfiles de tubos que figuran en alzado.

Cabe señalar que los tubos de emisión y recepción de cross-hole son paralelos entre sí y la trayectoria del frente de ondas que se registre en el ensayo ha de estar situada perpendicularmente a los planos de los abanicos de tratamiento. Esto es necesario para que los tubos metálicos de inyección no interfieran con la velocidad de propagación de las ondas en el terreno. De este modo, la mejora de suelo que se mide, corresponde únicamente al efecto de las lenguas de inyección.

En cada sección de ensayo cross-hole se ha utilizado un tubo de emisión y dos de recepción con el fin de eliminar el posible error introducido en las medidas por el tiempo de emisión de señal.

Los gráficos de  $V_s$  en los cuatro ensayos cross-hole realizados muestran, al inicio, que el terreno no tratado (que corresponde a suelo tipo D) presenta velocidades irregulares, generalmente bajas pero siempre superiores a 250 m/s ( $V_s$  entre 270 y 360 m/s), valor que se deducía de la información geotécnica aportada. En zona tratada, las velocidades medidas superan ampliamente las previsiones de proyecto en el que se planteaba obtener una media superior a 467 m/s.

Es importante reflejar que, en las zonas de tratamiento más cercanas a la superficie del terraplén, debido a la escasa profundidad se hace más complicado alcanzarlas presiones de tratamiento a efectos de controlar las posibles fugas de mezcla en superficie del terraplén contaminándolo. A pesar de esto las velocidades obtenidas han superado siempre los 555 m/s.

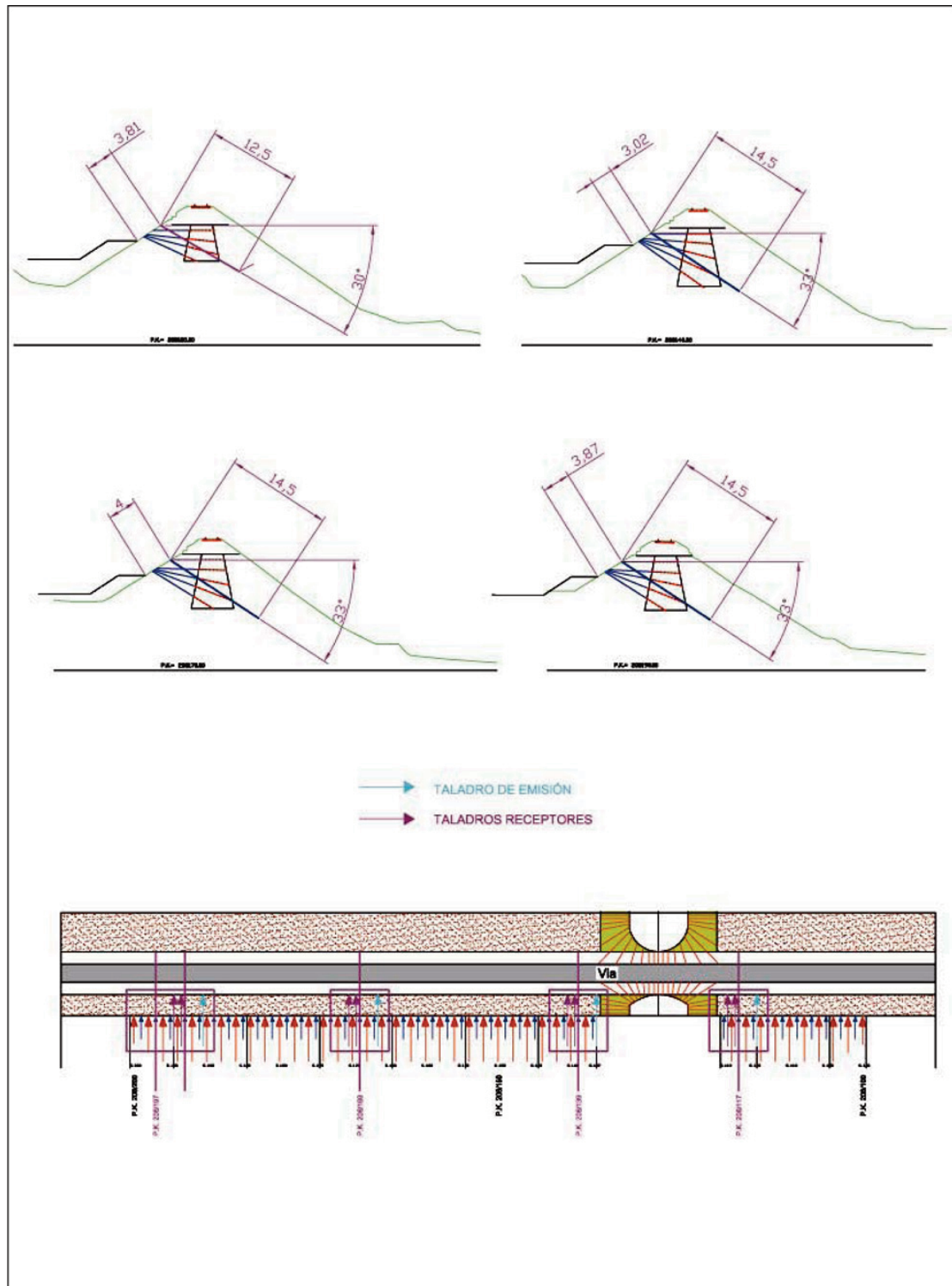
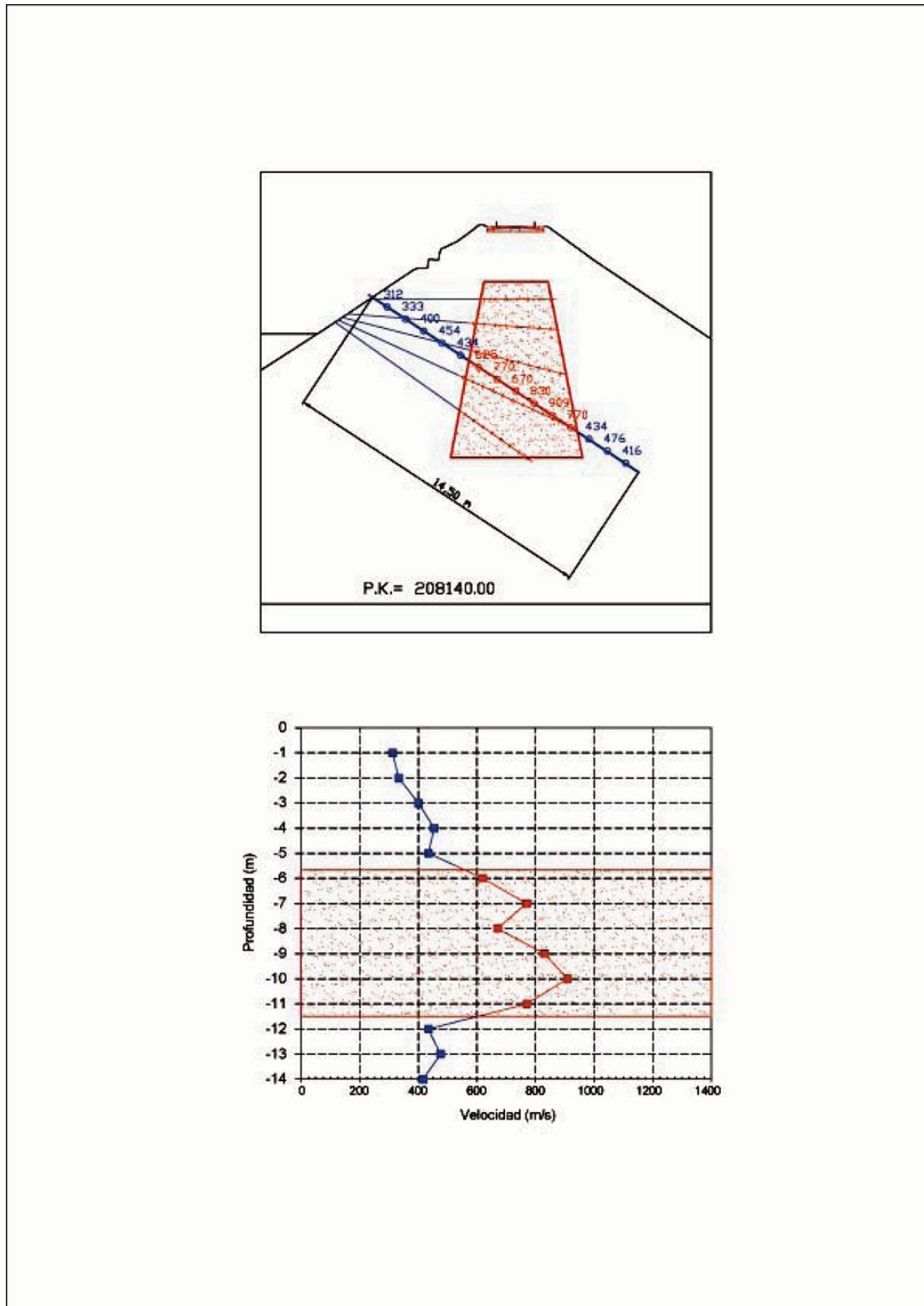


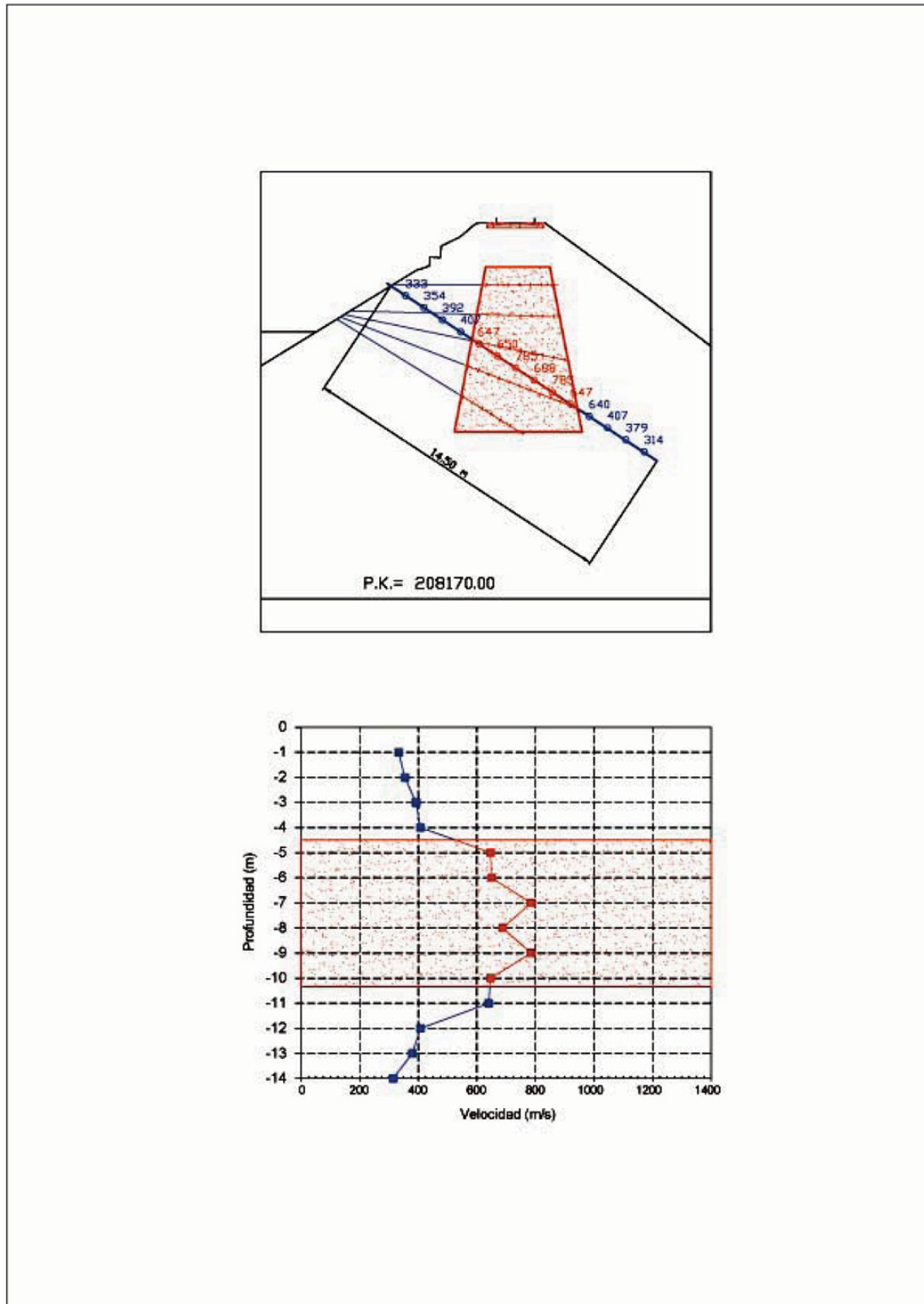
Figura 1. Planta y secciones de los ensayos Cross-hole



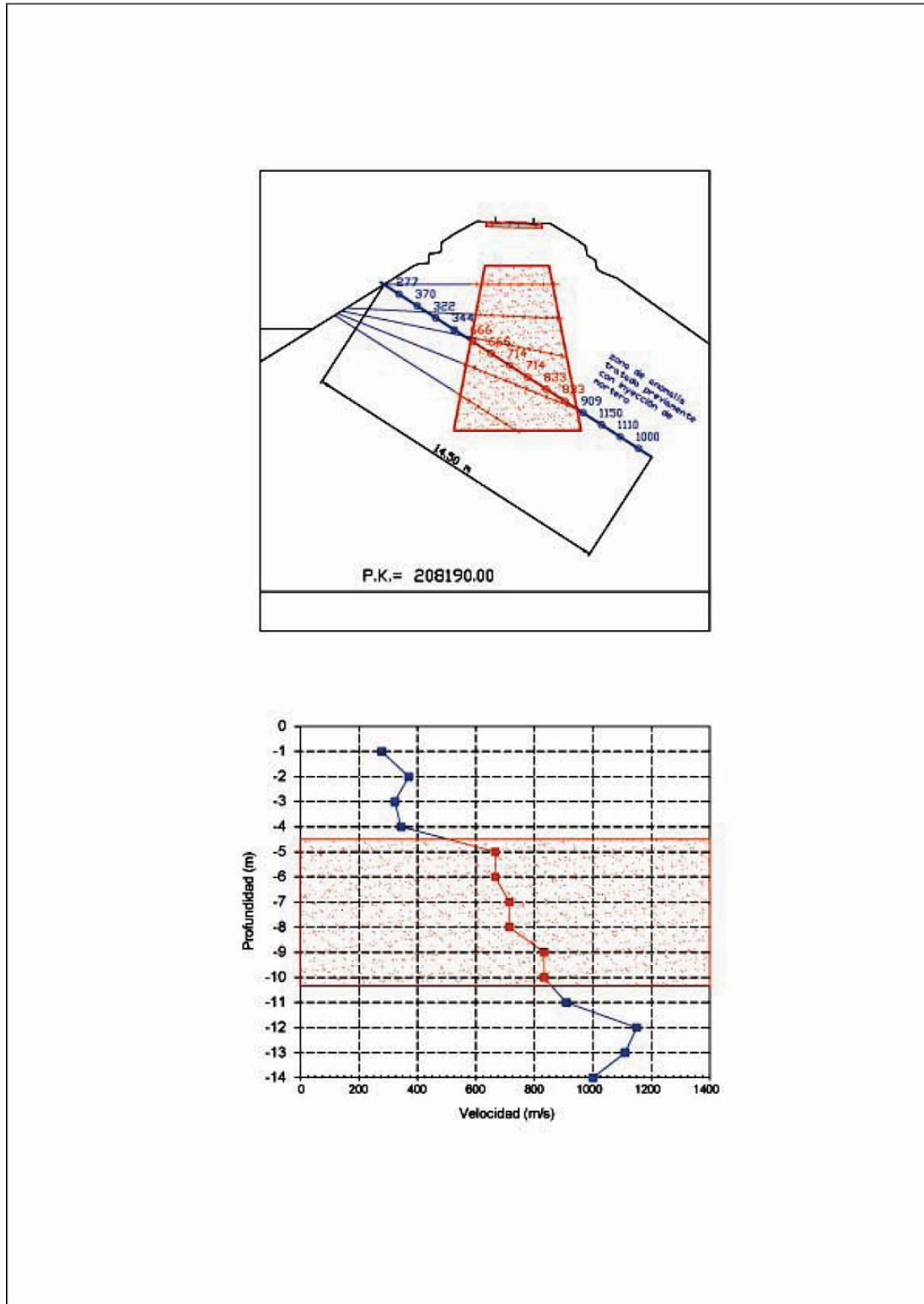


**Figura 2.b.** Ensayo Cross-hole nº2 P.K. 208-140  
Gráfica de resultados del ensayo





**Figura2.c.** Ensayo Cross-hole n°3 P.K. 208-170  
Gráfica de resultados del ensayo



**Figura 2.d.** Ensayo Cross-hole nº4 P.K. 208-190  
Gráfica de resultados del ensayo

Han de hacerse por tanto dos observaciones:

- Por un lado estas velocidades reflejan ya un suelo de compacidad más que suficiente para el objeto perseguido. Cabe recordar que en el Viaducto de Amposta en la zona más superficial tratada se obtenían velocidades  $V_s$  en torno a 400 m/s para inferiormente crecer a 500 y 600 m/s. Para estas condiciones se consiguió la rodadura confortable con un tráfico ferroviario que combinaba el Euromed a 200 km/h con trenes de mercancías. Esta situación se ha mantenido desde el verano de 2005 en que se efectuó el tratamiento.
- Por otra parte, en estas zonas más superficiales, la disposición de taladros en abanico introduce un importante efecto de bulonado o cosido del suelo tratado lo que, como se ha dicho anteriormente, potencia la mejora por encima del valor estricto de  $V_s$ .

En el ensayo nº4, en la parte final aumenta la velocidad  $V_s$  por encima de 900 m/s lo que corresponde a una zonacolvionar ala que ha accedido la inyección del mortero e inyección del sellado de los taladros de Cross-hole, produciendo su cementación.

A efectos de interpretación de las velocidades  $V_s$  en términos de módulo de deformación se pueden seguir los siguientes pasos:

- El módulo de rigidez dinámico  $G_d$ , se obtiene a partir de la velocidad  $V_s$  por medio de la relación

$$G_d = \rho \cdot V_s^2$$

Considerando, en el terreno tratado, en forma simplificada  $\gamma = 2T/m^3$

$$\rho = \frac{2 \frac{T}{m^3}}{g} = \frac{2 \frac{T}{m^3}}{9,81 \frac{m}{s^2}} \quad \text{luego } G_d = 0,2 \times V_s^2 T/m^2$$

Por ejemplo, si  $V_s = 600$  m/s,  $G_d = 72.000 T/m^2 = 7.200 \text{ kg/cm}^2$

- A partir de  $G_d$  obtenemos el módulo de Young dinámico

$E_d = G_d \cdot 2 \cdot (1 + \nu)$ , siendo  $\nu$  el coeficiente de Poisson

Si se acepta  $\nu = 0,35$

$$E_d = 2,7 \times G_d \quad \text{Para el caso anterior } E_d = 2,7 \times 7200 = 19.440 \text{ kg/cm}^2$$

- Habría de obtenerse finalmente el módulo de Young estático en función del módulo de Young dinámico.

Habitualmente  $\frac{E_d}{6} \leq E_s \leq \frac{E_d}{3}$

De forma conservadora  $E_{est} \geq \frac{E_d}{10}$

es decir,  $E_{est} \geq 1944 \text{ kg/cm}^2$

Este resultado se ha cumplido, ya que este valor obtenido es superior al módulo estático estimado en proyecto, que era de  $1200 \text{ kg/cm}^2$

#### 4. Conclusiones

La técnica de inyecciones armadas de fracturación hidráulica, que se ha utilizado en la obra de CONSOLIDACIÓN Y ESTABILIZACIÓN DE TERRAPLÉN FERROVIARIO ENTRE LOS PP.KK 208/100 Y 208/200, LÍNEA CALATAYUD – VALENCIA. TRAYECTO BARRACAS – MASADAS BLANCAS, permite una mejora muy acusada y controlable de suelos, incluso si estos son totalmente arcillosos, sin interrumpir el tráfico ferroviario, cumpliendo además la condición de conservar la vía en situación de rodadura confortable (movimientos del carril no superiores a 3 mm en 5 m), como también se pudo demostrar en la aplicación experimental de Amposta y en la posterior, llevada a cabo por el laboratorio de Geotecnia del CEDEX, en la marga arcillosa del Collado de Contreras.

Esta mejora es además realizable en paralelo con un control de deformaciones del entorno muy preciso, lo que permite la realización de este tratamiento bajo instalaciones en servicio que exijan deformaciones no superiores a 1/1000 e incluso 1/2000.

Los resultados de los ensayos de Cross-hole que se han realizado para cuantificar la mejora del terreno alcanzada, han reflejado la heterogeneidad de la composición del material del terraplén. Las velocidades de las ondas de cortante  $V_s$  obtenidas en la zona del prisma de terreno tratado están por encima de los 400 m/s, que es la velocidad a partir de la cual se consideró el proyecto de ejecución, que el terreno quedaría consolidado.

Por todo ello, se pone de manifiesto el éxito alcanzado en la realización del tratamiento, superando los parámetros fijados en proyecto, que indica que se han alcanzado los objetivos previstos, tal y como se refleja en los resultados de los ensayos de Cross-hole.

#### 5. Referencias bibliográficas

[1] ANTONIO SANTOS ET AL. Madrid (2000). “Sistema de mejora prefijada del terreno compatible con movimientos milimétricos del entorno”. Libro homenaje a Jose Antonio Jiménez Salas. Geotecnia en el año 2000.

[2] ANTONIO SANTOS, V. CUELLAR. Madrid (2006). “Mechanical improvement of an argillaceous marl through cement-based reinforced grouting”. Grouting soil improvement geosystems including reinforcement. Helsinki.

[3] Tratamiento de la cuña de transición en el acceso sur al Viaducto del Ebro (Amposta) realizado para ADIF dentro del proyecto Europeo SUPERTRACK.

## **6. Reportaje fotográfico**



**Fotografía 1.** Planta de inyección y depósitos de reciclado de agua.



**Fotografía 2.** Vista del terraplén con tráfico de viajeros durante la realización de los trabajos.



**Fotografía 3.** Vista del terraplén con tráfico de mercancías durante la realización de los trabajos



**Fotografía 4.** Trabajos de perforación en el terraplén.



**Fotografía 5.** Trabajos de perforación desde tunel existente bajo terraplén.



**Fotografía 6.** Disposición de abanicos de tratamiento.



**Fotografía 7.** Control de nivelación de precisión de la vía.