

REFLEXIONES SOBRE LA TIPOLOGÍA DE CIMENTACIÓN DE VIADUCTOS EN SUSTRATO YESÍFERO KARSTICO

Fernando Román. Prof. Dr. Ing. Caminos, C. y P. UPM
(Intecsa-Inarsa en la fecha de terminación del Proyecto)

1 INTRODUCCION

En la línea de alta velocidad (L.A.V.) del Nuevo Acceso Ferroviario a Levante, el tramo Campos del Paraíso a Horcajada de la Torre (provincia de Cuenca) transcurre en una parte de su recorrido por materiales miocenos (inferior y medio) constituidos por yesos que presentan fenómenos de disolución en forma de juntas verticales abiertas o de oquedades subhorizontales.

El trazado atraviesa una serie de valles en los que el sustrato yesífero está recubierto por depósitos cuaternarios aluviales de baja capacidad portante y con potencias de entre 6 y más de 10 metros. Concretamente se produce en cuatro de los cauces atravesados, el río de la Vega, el río Valparaíso, el arroyo de la Moraleja y el río Cigüela.

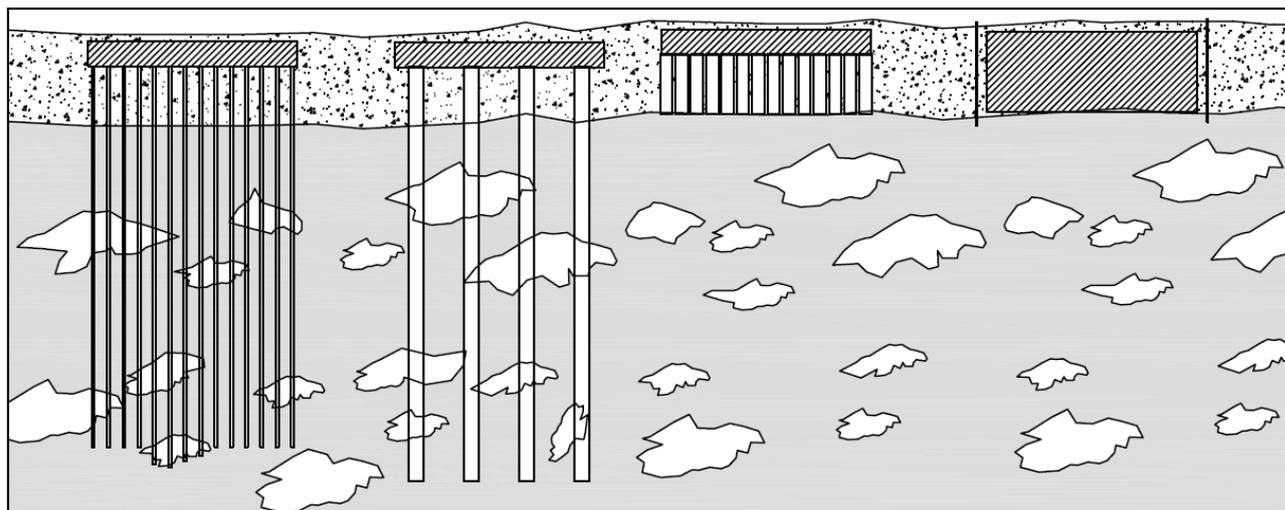
En el proyecto de la cimentación de estos cuatro viaductos, la presencia del yeso y su “karstificación” ha jugado el papel importante, pues las cargas de cimentación debían transmitirse a dicho yeso.

Se describe en esta comunicación las reflexiones conceptuales que se manejaron en el proyecto de estas cimentaciones.

2 TIPOLOGÍAS ANALIZADAS

- Zapata sobre columnas de jet-grouting
- Zapata sobre sustitución por hormigón HM-10 o cajón.
- Zapata-encepado con micropilotes.
- Encepado sobre pilotes.
- Inyección-relleno de las cavidades en la zona comprimida para cualquier cimentación.

Se esquematizan en la figura siguiente:



3 CARACTERIZACIÓN DEL SUSTRATO YESÍFERO

Se trata de un esqueleto o matriz yesífera en donde se midieron resistencias de 120 a 390 k/cm² en la que se intercalan cavidades vacías, cavidades rellenas de arcillas yesíferas, tramos de yesos pulverulentos y niveles de arcillas. Los reconocimientos realizados, sondeos y tomografías, no permitieron establecer con precisión ni el tamaño ni la densidad de concurrencia de estos huecos y de niveles “blandos” dentro del esqueleto resistente.

A la vista de estos resultados se planteó que una buena forma de precisar la forma y el tamaño de estos huecos o zonas débiles podría sería ejecutar una malla de perforaciones de unos 35-40 m de profundidad con separaciones de 5 m, es decir 3 cada 5 metros de viaducto, y confeccionar un “mapa” tridimensional. Sin embargo debe resaltarse la dificultad que se tuvo en algunos reconocimientos con sondeos a destroza para realizar estas perforaciones. En bastantes ocasiones cuando se atraviesa una cavidad de más de 2-3 metros de altura y se hace trabajar a la cabeza de perforación (tricono, trialeta) en el fondo de la cavidad ocurrieron roturas de varillaje por pandeo y falta de confinamiento lateral. Se perdieron varillas y cabezas que supusieron demoras y costes notables (piénsese que si bien estos costes no tendrían una incidencia notable en el coste de la obra, si la tienen en la fase del proyecto).

Había además algunos aspectos que penalizaban también este tipo de investigación durante el proyecto. Entre otros aspectos estaba el hecho de que las perforaciones, cuantas más numerosas y menos separadas con el fin de detectar las cavidades, provocaban al final un conjunto de puntos de comunicación de estas zonas entre sí.

Se hicieron ensayos hidrogeológicos de achiques a distintas profundidades deduciéndose que el sustrato yesífero estaba saturado y que había una notable comunicación entre cavidades por las fisuras existentes en la matriz yesífera. Se vio que la transmisividad entre el acuífero superficial del aluvial y el profundo de los yesos era apenas existente. Por ello si el reconocimiento con taladros detectaba una importante red de cavidades, al final lo que se estaba haciendo era conectarlas entre sí con los taladros. De inmediato surgió la conclusión de sellar con cemento las perforaciones para evitar estas conexiones en un futuro. Pues bien, debemos decir que en el proceso de sellado de los taladros para la instalación de las tubos piezométricos en los sondeos de reconocimiento hubo serios problemas de conseguirlo, que motivaron reperforaciones en muchos casos. Hubo sondeos en los que se tuvo prácticamente que abandonar el proceso de sellado por la imposibilidad de conseguirlo. Este hecho avisaba de la dificultad que tendría el sellado o relleno de oquedades e iba a influir en la toma de alguna decisión posterior. De ahí que se haya comentado.

Por todo esto, se planteó un modelo de sustrato con presencia de huecos, vacíos o rellenos, y posiblemente intercomunicados entre sí. De los datos inicialmente obtenidos se planteó la posibilidad de que aparecieran en los primeros 30-35 metros, cavidades con dimensiones del orden de 4 a 6 metros en ambos sentidos y con intercalaciones sólidas similares del orden de 3-4 metros. Esto suponía un volumen de huecos de un 10 %.



En la fotografía del margen puede verse una cavidad en la proximidad del trazado

4 CIMENTACIÓN DIRECTA

Se plantearon dos posibilidades:

- Ejecutar una pantalla de tablestacas y a su abrigo construir una cimentación directa en profundidad.
- Tratar el terreno bajo una zapata convencional con columnas tipo jet-grouting cuya misión es transmitir las cargas en profundidad por su punta.

En cualquier caso lo que teníamos eran las cargas actuando sobre el sustrato yesífero.

Se realizaron cálculos concluyentes que cavidades de las dimensiones apuntadas no suponían una merma en la resistencia global del conjunto pues las deformaciones de los “techos” no eran significativas ni los “pilares” entre cavidades se sobrecomprimían en exceso peligroso (35-40 kp/cm²). La condición es que la cavidad apareciera a 5 metros de profundidad.

Si se construían zapatas profundizadas en un recinto de tablestacas, o de cualquier otro tipo de pantalla, la cimentación era sencilla de dimensionar pues se trataba de una zapata convencional.

Si se hubiese querido evitar los recintos tablestacados cabía la posibilidad de construir una zapata a la profundidad mínima, 1.50-2 metros por ejemplo, y ejecutar columnas de suelo-cemento (jet-grouting) que se apoyasen en el sustrato. Con cargas de, por ejemplo las de un estribo de uno de los viaductos del orden de 2.500 t, y aceptando columnas que soporten compresiones de 40 t, resultaban columnas a razón de una cada dos metros cuadrados, 64 columnas.

El riesgo de estas cimentaciones directas estaba en que pudiera existir una cavidad más cercana al apoyo de la zapata y/o de mayores dimensiones, sobre todo horizontales, que provocara unos esfuerzos inadmisibles de flexión en la clave de la cavidad y un posible colapso de la zapata. Incluso con cavidades como las supuestas, existía el riesgo de que las dimensiones manejadas evolucionaran en el tiempo hasta llegar a ser críticas.

En estos casos es evidente que la cimentación directa sobre el techo del sustrato yesífero no sería admisible.

Ante la duda de las dimensiones de las cavidades y de su distribución bajo la zapata, es evidente que cuanto más amplia fuese la zapata el riesgo disminuía. Por lo tanto, si se proyectaba una gran zapata, de gran canto, convenientemente armada, los cambios en el sustrato debidos a la evolución de cavidades, quedarían “puenteados” impidiendo deformaciones o descensos de las zonas del apoyo.

La solución a estos riesgos estaba siempre en un tratamiento previo rellenando los huecos con hormigón, mortero o inyecciones de lechadas de diferentes dosificaciones y densidades. Es decir macizar el sustrato. Debe decirse que, como proyectistas, poner en práctica esta solución era considerada de cierta dificultad.

Por esta razón el estudio se volcó en una cimentación profunda.

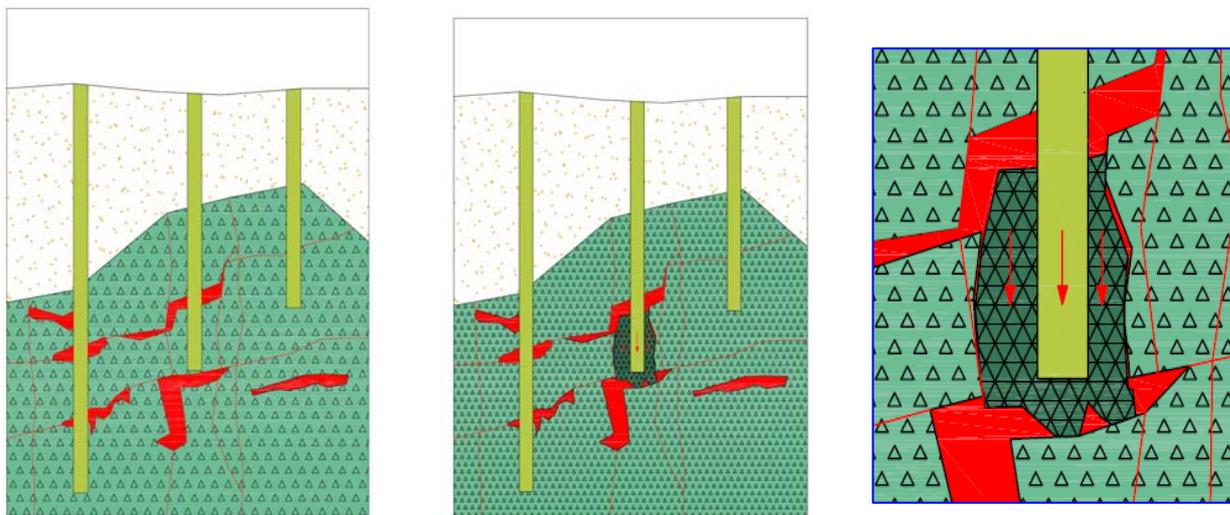
5 CIMENTACIÓN PROFUNDA CON PILOTES

5.1 CRITERIO PARA DEFINIR LA LONGITUD

En las cimentaciones directas, las tensiones se transmiten al techo del sustrato y se reparten por el “esqueleto” de los yesos puenteando las cavidades.

En la solución con pilotes, como premisa, no se tiene en cuenta la resistencia por la punta y las acciones se transmiten por el fuste de los pilotes a dicho esqueleto puenteándose asimismo las cavidades. Por lo tanto el aspecto fundamental es establecer a priori la existencia de los tramos yesíferos sólidos que resisten por fuste.

En el caso de que una cavidad cercana a la superficie colapsara, quizás favorecida por las perturbaciones provocadas por la perforación de los pilotes, se tendría que algunos pilotes dejarían de ser resistidos por su fuste en una parte de su longitud. Las figuras siguientes ilustran el fenómeno.



En unos casos fallarían, en otros, e sobrecargarían los tramos inferiores de dichos pilotes o, incluso, los pilotes de al lado, y se tendría a los pilotes trabajando con un coeficiente de seguridad menor. El criterio a establecer debía ser que este coeficiente de seguridad no descendiera por debajo de un determinado valor, y siempre superior a la unidad.

Partiendo del posible conocimiento de los tramos de yeso “sólido”, otro inconveniente que se planteaba a priori era el de la continuidad del hormigonado al tener que atravesar los tramos de cavidades y, en particular, las no rellenas.

Para esto se establecieron inicialmente procedimientos o medidas constructivas como las siguientes:

- Disminuir la armadura hasta la menor posible para permitir la salida del hormigón cuyo “cono” rellenara la cavidad parcialmente, formando una cierta “pata de elefante”. Esto solo es posible a partir de la profundidad en la que deje de ser necesaria estructuralmente.
- Disponer revestimientos perdidos en los tramos con cavidades.

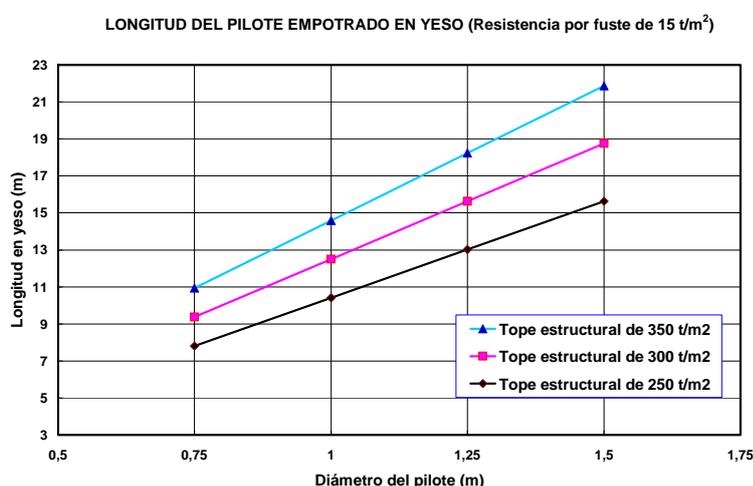
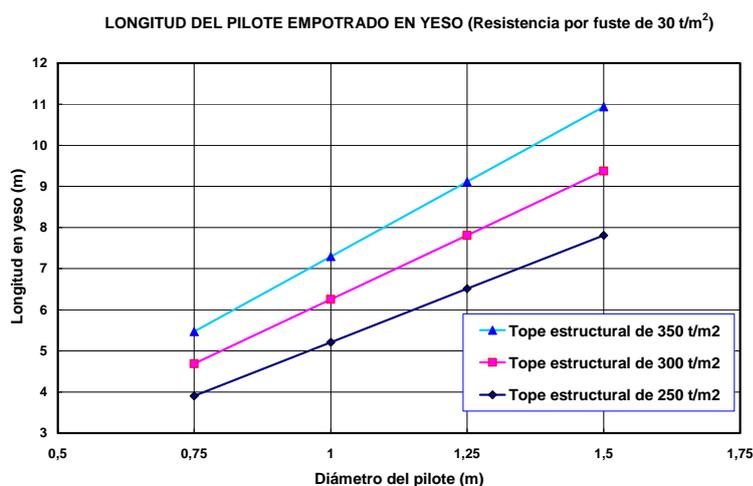
Finalmente el criterio que se estableció como premisa fue:

- Cimentar con muchos pilotes y poco cargados.
- Que resistiendo solo por el fuste, tuvieran un coeficiente de seguridad mayor de 2.5.
- Lo anterior se traducía en atravesar una mínima longitud en sustrato de yeso sólido.
- Medir un exceso notable de hormigón debido al “relleno” parcial de estas cavidades.
- Establecer en el Pliego de Condiciones un protocolo de investigación y de actuación en la obra para reajustar las longitudes de cimentación de cada pilote con unos criterios que no dejaran duda de interpretación.

Las mínimas longitudes de fuste que se calcularon se pueden ver en los gráficos siguientes en los que se manejaban tres topes estructurales de 250, 300 y 350 t/m² y dos resistencias “últimas” por fuste en los yesos de 15 y 30 t/m², valores que pueden marcar un rango obtenido a partir de los parámetros siguientes de los yesos:

- Resistencia a compresión simple de la roca sana 120 kp/cm².
- Grado de meteorización III (roca moderadamente meteorizada), con lo que el factor $\alpha_2 = 0,50$

- Tomamos conservadoramente un RQD de 50 del que resulta $\alpha_3 = 0,70$.
- Carga resistente por fuste igual a la décima parte de la resistente por la punta



Por ejemplo, para un pilote de diámetro de 1,25 m y haciéndole trabajar a un tope estructural de 250 t/m², se concluía que bastaba con tener un tramo sólido resistente en estos yesos de algo menos de 7,00 m. En caso de que la resistencia del yeso fuera la mitad, es evidente que se necesitaría doble longitud de yeso “rozante”, es decir minorando por dos la resistencia anterior obtendríamos una longitud rozante necesaria de 13,00 m. Se fijó como dato de partida un espesor mínimo de 10 m de yeso sólido.

Realmente lo que se tenía en el terreno era una sucesión de tramos sólidos y tramos con huecos o niveles débiles. Por ello entendimos que no podía admitirse que la longitud mínima de los gráficos se obtuviera con la suma – sin más – de los tramos sólidos. Era necesario un mínimo espesor de esqueleto sólido para contar con su resistencia pues podría llegarse a la situación de fallo del tramo rozante al no contar con base suficiente en el tramo inmediato inferior.

El patrón adoptado fue el de aceptar la longitud de pilote resultante siempre que hubiera un espesor de esqueleto sólido continuo igual al 80 % de la dimensión en vertical de la cavidad o zona débil inmediata inferior.

La decisión de adoptar una cimentación profunda con estas premisas debía venir acompañada del hecho de fijar en el Pliego aquellas Condiciones que garantizaran que las hipótesis de cálculo se cumplieran. A este respecto, debe decirse que el Contrato de Asistencia técnica del proyectista con el entonces GIF incluía la asistencia a la Dirección de obra, argumento que apoyaba la decisión.

5.2 CONDICIONES DE EJECUCIÓN

Lo que se incluyó en el Pliego de Condiciones para definir en obra la longitud aceptable para cada pilote se basó fundamentalmente en las ideas siguientes:

- a) Tras el replanteo de los ejes de los pilotes debería realizarse una campaña complementaria de reconocimientos con sondeos y taladros.
- b) Como mínimo, en las esquinas de una diagonal del encepado de pilotes se perforarían dos sondeos y un taladro en el centro del encepado con un equipo que pudiera registrar parámetros de perforación. Los taladros podrían aumentarse hasta completar la totalidad de los pilotes.
- c) Los sondeos serían a rotación con testificación continua con la longitud suficiente para poder tarar los parámetros de perforación del taladro y poder identificar estos con la calidad y resistencia de los yesos.
- d) A pie de sonda un geólogo registraría el resultado de la perforación, determinado el RQD y los demás parámetros influyentes en la determinación de la resistencia por el fuste; se tomarían muestras de la roca de yeso a intervalos regulares con el fin de determinar su resistencia a la compresión simple prácticamente 24 horas después de su extracción
- e) Se determinaría la interrupción del taladro cuando se hubieran atravesado más de 10,00 m de tramos de yeso sólido (magnitud fijada anteriormente) y siempre que estos tramos fueran de mayor potencia que la de los huecos que existieran entre ellos. Una vez alcanzada esta suma de 10,00 m, si la boca del taladro estuviera en una cavidad se continuaría hasta perforar 2,00 m bajo la base de dicha cavidad.
- f) En el caso de que el Geólogo, por experiencia contrastada, dedujera que la resistencia del yeso fuera inferior a los 120 k/cm² de partida, o que los restantes parámetros condujeran a una necesidad de mayor longitud resistente por fuste, el sondeo o los taladros se aumentarían de longitud.
- g) La profundidad del pilote sería entonces la delimitada por la punta del taladro/sondeo o por la base de la cavidad inmediata a esta profundidad, siempre que el taladro/sondeo hubiera atravesado por debajo de 2 metros de yeso sólido.

Y en cuanto a la propia ejecución del pilote, las premisas fueron:

- h) El pilote se ejecutaría con lodos en el tramo de yesos. Cuando se atraviesa una cavidad parcial o totalmente vacía, el descenso de los lodos podría proporcionar una idea del volumen de la misma.
- i) En ese momento se retiraría la herramienta de perforación y se procedería a la inyección o relleno de la cavidad con mortero M-80 con 1 % de bentonita hasta que la mezcla asciendiera en la perforación por encima del techo de la cavidad
- j) Se esperaría un plazo mínimo de 10 horas o el tiempo que la Dirección de Obra determinase para conseguir un mínimo fraguado del mortero.
- k) Se continuaría la perforación del pilote reperforando el mortero inyectado y, a continuación, el siguiente tramo de yesos hasta alcanzar la profundidad final.
- l) La Dirección de Obra determinaría el orden a seguir en la ejecución de los pilotes a partir del resultado de los sondeos y taladros para conseguir un adecuado relleno de las cavidades que pudieran afectar a más de un pilote.

Pese a que los pilotes se calculaban resistiendo exclusivamente por su fuste, el Proyecto previó la posible inyección por la punta para lo cual el Pliego también exigía requerimientos como los siguientes:

- m) Control sónico a través de cuatro tubos metálicos soldados a la armadura
- n) En pilotes designados por la Dirección de obra y a través de los tubos sónicos se ejecutarían perforaciones verticales en el sustrato, bajo el extremo inferior del pilote,

con una longitud mínima tal que cada perforación alcanzase cinco (5) metros por debajo del pilote. Si entre 4 y 5 metros, las referidas perforaciones detectaran intercalaciones blandas o vacías en el sustrato, se prolongarán de modo que, el espesor de roca sólida bajo la última intercalación blanda no fuera inferior a dos (2) metros.

- o) Eliminación, inyección o relleno de las zonas blandas o vacías según un protocolo que se especificaba con un minucioso detalle de método, secuencias de trabajo y presiones límites a conseguir.

6 CIMENTACIÓN PROFUNDA CON MICROPILOTES

Todo lo del apartado anterior sería de aplicación a una cimentación con micropilotes con las salvedades siguientes:

- A priori deberíamos estar hablando de la gama superior de micropilotes, de 300 mm de diámetro
- La capacidad estructural de estos micropilotes puede ser de 80 a 100 t y para ir a longitudes “rozantes” similares a las de los pilotes, deberíamos ir a un número de micropilotes del orden de 3 a 3,50 veces el número de pilotes de, por ejemplo, 1,25 m de diámetro.
- Las condiciones de ejecución serían similares si bien en la perforación del micropilote se puede usar un equipo que permita apreciar las cavidades con la misma sensibilidad de la de los taladros en cuyo caso éstos no se harían.

7 CONCLUSIONES

En primer lugar creemos necesario recalcar que esta situación de viaductos cimentados en sustrato yesífero kárstico no se hubiera evitado más que con un cambio sustancial de trazado pues habría que haber desplazado el trazado bastantes kilómetros al norte y bastantes más hacia el sur, a lo largo de los cauces, para estar en una situación mejor por este concepto. Es decir el análisis que se hacía surgió de la imposibilidad de un trazado radicalmente distinto que hubiera afectado no sólo a este tramo sino también al contiguo y sin tener la seguridad de no estar cambiando este tipo de problema por otros que pudieran ser de mayor importancia.

En segundo lugar, a la vista de la exposición anterior, concluimos en su día que la cimentación que como proyectistas nos ofrecía más garantía, era la de una cimentación profunda con pilotes en cuya valoración se previera una importante cantidad presupuestaria para el relleno de cavidades y - lo que considerábamos de vital importancia - con la inclusión en el pliego de condiciones de unas concretas especificaciones sobre el procedimiento a seguir durante la ejecución.

En otra comunicación presentada a esta Jornada se exponen aspectos de la obra en la que se ha seguido las ideas plasmadas en este análisis con la natural adaptación a las condiciones resultantes de los reconocimientos complementarios y a las particularices de plazos, equipos y medios del contratista ejecutor de la obra.

8 AGRADECIMIENTOS

El autor agradece al Administrador de Infraestructuras Ferroviarias (ADIF) la autorización para la publicación de esta comunicación y a la empresa Intecsa-Inarsa el permiso para suscribir la autoría, dado que en la fecha de realización de este proyecto, el autor era Jefe de la División de Ingeniería del Terreno y responsable técnico de este estudio.