

CIMENTACIÓN DEL VIADUCTO DEL CIGÜELA MEDIANTE PILOTES EMPOTRADOS EN YESOS KARSTIFICADOS

Raúl Correas, Ing. Caminos, C. y P. ADIF

Miguel Cuesta, Ing. Minas, Intecsa-Inarsa

Fernando Román, Prof. Dr. Ing. Caminos, C. y P. UPM

Jordi Vinyals, Ing. Caminos, C. y P. Intecsa-Inarsa

1 DESCRIPCIÓN DEL VIADUCTO

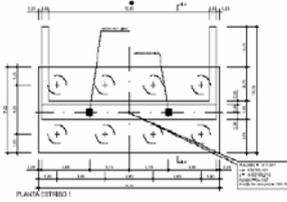
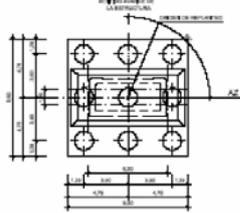
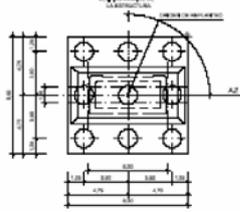
En la actualidad, el Administrador de Infraestructura Ferroviaria se encuentra acometiendo las obras correspondientes a la Línea de Alta velocidad de Levante Madrid – Castilla La Mancha – Comunidad Valenciana – Región de Murcia. Dentro de esta Línea, en el tramo Campos del Paraíso - Horcajada de la Torre, es necesario el cruce sobre el Río Cigüela y su llanura de inundación, para lo cual se ha finalizado la construcción de un viaducto. Se centra este trabajo en este viaducto pero, además, merece la pena reseñar que en este tramo hay más viaductos de menor longitud cimentados en condiciones similares.

El Viaducto sobre el Río Cigüela presenta una longitud total entre ejes de apoyo en estribos de 1448 m y se divide en cuarenta vanos de 35 m más dos vanos de 24 m de luz situados entre las pilas 26 y 28. El ancho del tablero es de 14 m para dar servicio a dos vías de ferrocarril dispuestas con un intereje de 4,70 m. La sección del tablero consta en todos sus vanos de 2 vigas artesa prefabricadas de 2,55 m de canto dispuestas a 6,30 m de intereje y una losa de compresión hormigonada “in situ” de espesor variable, 0,25 m en extremos y 0,39m en eje.

La subestructura se compone de pilas de hormigón con sección cajón hueca, acabadas en un dintel sobre el que apoyan las vigas mediante aparatos de apoyo tipo POT. Se disponen en todos los vanos un apoyo fijo en un extremo junto con un apoyo libre y un apoyo fijo transversalmente y otro libre en el otro extremo. En los extremos de la estructura se disponen estribos de hormigón. En todos los casos las cimentaciones son profundas mediante pilotes excepto en el final del viaducto en el que se cimenta directamente el estribo 2 en la roca yesífera que aflora en la ladera.

Las cimentaciones profundas están compuestas por 9 pilotes por encepado, de diámetro 1500 mm, salvo el estribo 1 que consta de 8 pilotes, y para su cálculo se ha considerado un comportamiento de tipo “pilotes empotrados en roca”.

La tabla adjunta muestra un resumen de la tipología de la cimentación y las cargas existentes, tanto por pila como por pilote.

Elemento	Nº de pilotes	Carga vertical por pilote	Esquema
ESTRIBO 1	8	6300 KN	
PILA 1-12 y PILA 14 -24	9	6300 KN	
PILA 13 y PILA 25 - 41	9	7000 KN	

Las tensiones de trabajo en el hormigón de los pilotes del Viaducto se limitan a:

Pila	Carga vertical por pilote	Nº Pilotes	Tensión de trabajo
Pilas 1-12 Pila 14-24	6300 KN	9	40 kg/cm ²
Pila 13 Pilas 25-41	7000 KN	9	45 kg/cm ²

2 DESCRIPCIÓN DEL TERRENO DE CIMENTACIÓN

El terreno está constituido por materiales cuaternarios (Qf), formados por el aluvial y llanura de inundación del río Cigüela (gravas, arenas y arcillas) apoyados sobre un paleorrelieve del Mioceno medio (Unidad Mi-2.1) formado por una alternancia de arcillas margosas y yesos con niveles de calizas asociadas, siendo el material más abundante el yeso masivo. En el inicio del viaducto, entre el cuaternario y la Unidad Mi-2.1, aparece una unidad posterior del Mioceno medio, la Mi-2.3, formada por arcillas, gravas, arcillas margosas y margas limolíticas.

Para la caracterización del terreno se han utilizado sondeos, sondeos de destroza y ensayos de penetración dinámica tipo DPSH realizados tanto durante la fase Proyecto Constructivo, como durante la obra. En esta última se han realizado al menos dos sondeos en cada encepado. Los primeros metros, correspondientes al terreno aluvial, se han realizado sin recuperación de testigo y solamente se ha recuperado testigo en la unidad M.I-2.1.

En la mayor parte del viaducto el aluvial del río Cigüela (Qf), presenta un espesor máximo de unos 30 m con un valor medio de unos 11 a 14 m. Los ensayos SPT realizados han dado golpes comprendidos entre 2 y 38, con valores medios en torno a los 8 golpes. Bajo el aluvial aparece el sustrato yesífero (Unidad Mi-2.1), formado por yesos masivos con diferentes grados de alteración, donde se detectan cavidades rellenas, alguna vacías, intercalaciones de fangos y niveles de margas.

En el estribo E-2, cimentado sobre una ladera en la que aflora la Unidad Mi-2.1, de yeso masivo, tras una investigación de posibles cavidades con georradar y taladros de comprobación que detectó algunas cavidades centimétricas asociadas a fisuras, rellenas de arcilla, se decidió cimentar en la superficie previa inyección de lechada de cemento para el relleno de las zonas con fisuras. Debe decirse que de no tener un cuaternario de gran espesor, hubiese sido factible realizar toda la cimentación del viaducto siguiendo esta filosofía: investigación de cavidades, relleno de éstas y cimentación directa de las pilas.

En las dos figuras de la página siguiente se hace una extracción del perfil geológico de la parte del viaducto con mayores problemas de cimentación.

3 FILOSOFÍA O CONCEPTOS MANEJADOS EN CUANTO AL TIPO DE CIMENTACIÓN

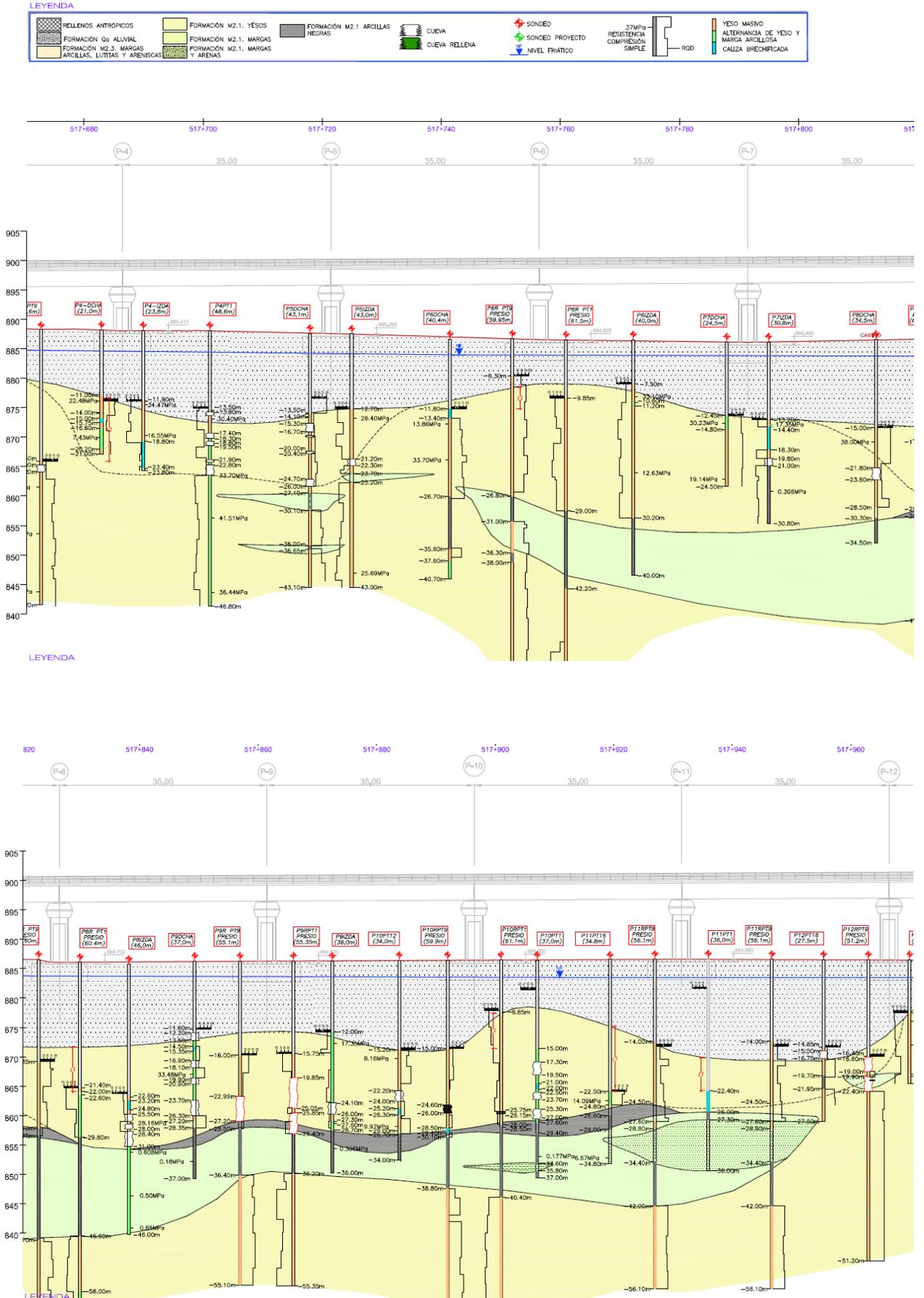
En una comunicación presentada por F. Román a esta Jornada se exponen las reflexiones conceptuales manejadas al tomar la decisión de cimentar el viaducto con pilotes empotrados en el sustrato yesífero y con la particularidad derivada de la aparición de cavidades por disolución.

A dicha comunicación nos remitimos.

4 SOLUCIÓN EJECUTADA

En obra, siguiendo las ideas del Pliego de Condiciones del Proyecto, se efectuó una amplia campaña de sondeos que mejoró sustancialmente la información de partida. En resumen, se constató que los materiales yesíferos eran más compactos (resistencias a compresión de hasta 50 MPa) y con menor fracturación de la supuesta inicialmente lo que, aunque era positivo para la longitud de los pilotes, complicaba su perforación.

Perfil parcial geológico del viaducto (9 de las 41 pilas)



Por otro lado, se confirmaba la existencia de cavidades y la posibilidad de su evolución por disolución del yeso al existir circulación subálvea. El Adif consideró importante que se respetarán las premisas del Proyecto de Construcción, en el sentido de que se garantizará el nivel de seguridad de las cimentaciones a lo largo de la vida en servicio del viaducto, por lo que se modificó el criterio de diseño de los encepados, teniendo en cuenta la mejora resistente del terreno, pero manteniendo unos parámetros por debajo de los máximos permitidos en las recomendaciones, de tal forma que resultara un mayor número de pilotes por encepado que con un dimensionamiento ajustado, lo que permite, en caso de pérdida de capacidad portante de alguno de los pilotes por evolución de las cavidades del karst, el puenteo de las cargas hacia otros pilotes que no se habían dimensionado agotando su resistencia.

Debido a esta cierta mejora en el terreno de cimentación, los cambios más significativos respecto al proyecto son:

- Aumento del diámetro de los pilotes de 1,25 metros a 1,50 metros.
- Disminución en el número de pilotes por encepado, pasando de 16 a 9 pilotes en encepados de pilas y de 12 a 8 pilotes en el encepado del estribo 1.
- Se ha considerado ahora un cierto aporte de la resistencia por punta, inicialmente despreciada en el proyecto de construcción, la cual se limita a un valor máximo de 250 t/m², muy por debajo de la que resistiría el yeso masivo detectado.
- En varias pilas se caracterizan las margas grises de la unidad Mi-2.1 con ensayos presiodilatométricos, obteniendo una resistencia por fuste y por punta de esta unidad.
- No se efectúan los taladros previos a destroza con carro de perforación, confiando en la información de la campaña de sondeos de proyecto y de construcción, debido a que la constructora no garantizaba su verticalidad en estos terrenos.

5 AJUSTE DE LA CIMENTACIÓN CON LOS NUEVOS DATOS

5.1 PARÁMETROS DE LA CIMENTACIÓN CON LOS NUEVOS DATOS

A resultas de las consideraciones anteriores, los parámetros de cálculo de los pilotes han sido los siguientes:

- El diámetro efectivo ha sido de 1,40 m impuesto por el encamisado en el aluvial.
- El cálculo de la resistencia aportada por los yesos se ha realizado utilizando parámetros ponderados.
- La resistencia por punta de los yesos se ha limitado a un valor máximo de 250 t/m².
- Se ha despreciado la resistencia por fuste en el aluvial, en las cavidades rellenas con arcillas, en las cavidades que se rellenarán según se indica en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares y en las arcillas negras.
- En las margas se ha considerado un valor de resistencia admisible por fuste de 0,1 MPa y de resistencia admisible por punta de 1 MPa, excepto en el caso de los encepados de las pilas 8, 9, 10 y 11, en los cuales se ha estimado la resistencia por fuste y por punta de las margas en base a los resultados de los ensayos presiodilatométricos realizados que han permitido contar con unos valores tres veces mayores.

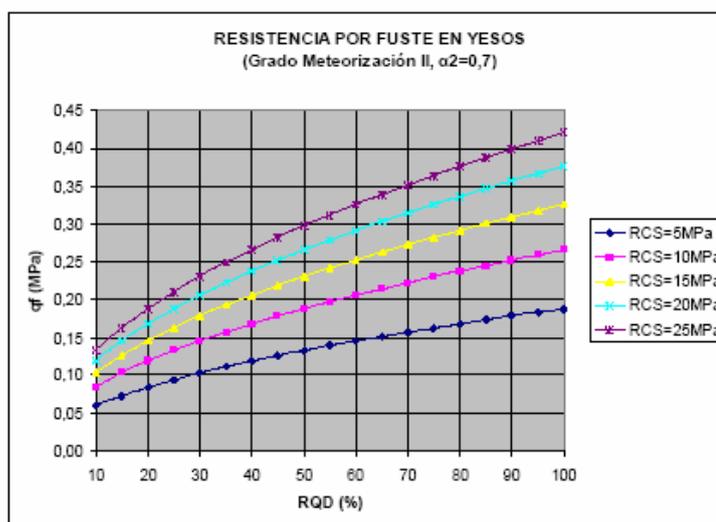
5.2 RESISTENCIA POR FUSTE DE LOS PILOTES EN EL EMPOTRAMIENTO EN LOS YESOS

De acuerdo con la Guía de Cimentaciones en Obras de Carretera del Ministerio de Fomento, la resistencia por fuste de los pilotes en roca se calcula como el 10% de la resistencia por punta de los mismos. Esta resistencia por punta se calcula a partir de tres parámetros α_1 , α_2 y α_3 .

- α_1 depende del tipo de roca
- α_2 depende del grado de meteorización.
- α_3 depende de la resistencia a compresión simple (RCS).

De acuerdo con los sondeos realizados, el grado de meteorización de los yesos en la cimentación se ha considerado siempre II; por tanto, el valor de α_2 debe ser siempre 0.7. Sin embargo, puesto que se ha decidido limitar el valor de la RCS a 25 MPa, se ha tomado un valor de 0.75 para valores de la RCS de 25 a 30 MPa, 0.80 para valores de la RCS de 30 a 35 MPa y 0.85 para valores de la RCS de 35 a 40 MPa.

Con el fin de que se pudieran tomar decisiones rápidas en obra, se han confeccionado unas gráficas que permitan determinar los valores de la resistencia unitaria por fuste "última" de la roca (q_f) a partir del RQD y de la RCS de la roca sana obtenidos en los testigos de los sondeos. Con ello se podía limitar la profundidad en cada pilote. A modo de ejemplo se incluye una de ellas.

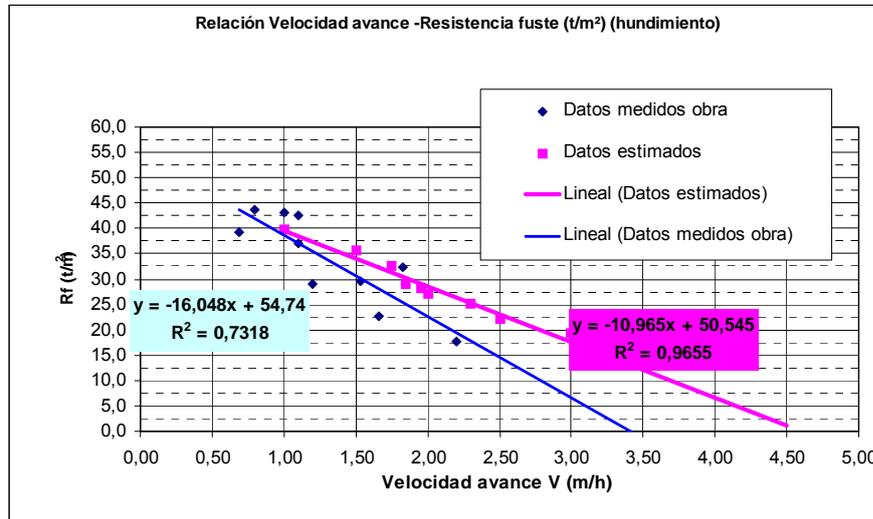


5.3 AJUSTE DE LOS PARAMETROS DE CÁLCULO EN OBRA A TRAVÉS DEL SEGUIMIENTO DE LA PERFORACIÓN DE LOS PILOTES.

Tomando como base la experiencia de los equipos participantes en la Dirección de obra y los ligados al contratista, se estimó una correlación entre las velocidades de perforación y los datos de R.C.S y de R.Q.D. con los cuales se comenzaron a perforar los primeros pilotes. En el gráfico incluido más adelante se ha representado esta estimación.

Una vez realizada la perforación de varios pilotes y reanalizando todos los datos de R.C.S y de R.Q.D de la campaña complementaria de sondeos, se comprobó que en el viaducto existían dos partes diferenciadas en el sustrato yesífero. Una primera, desde el E1 hasta la pila 20, donde los R.Q.D. y las R.C.S presentan una alta dispersión en sus valores, además de presentar multitud de zonas con cavidades y discontinuidades importantes; y la segunda parte, desde la pila 21 hasta la pila 41, en la que se observa una disminución en los rendimientos de la perforación en los pilotes que se habían comenzado a ejecutar en esta mitad, lo cual, a tenor de los datos geotécnicos, se debe a una mejora de los parámetros resistentes de la roca yesífera ligada a una menor presencia de discontinuidades y de fenómenos de disolución.

De este análisis salió una segunda correlación indicada en el gráfico anteriormente mencionado, que se incluye a continuación.

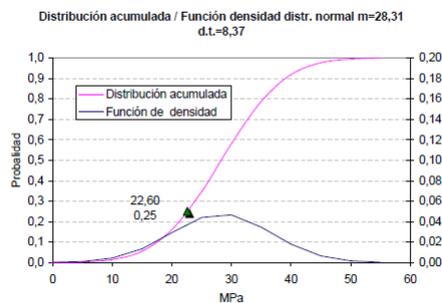


A medida que se iban ejecutando más pilotes se tomaban nuevos puntos con los que ajustar la curva, lo que ha ido confirmando la bondad de los parámetros estimados con esta metodología.

Una vez ajustada la recta, se iba preparando in situ y prácticamente al mismo tiempo que la perforación progresaba, una tabla para cada pilote en la que se calculaba la contribución a la resistencia tanto de la punta como del fuste por cada tramo de perforación de 0,5 metros, lo que permitía tomar la decisión sobre la finalización de la perforación.

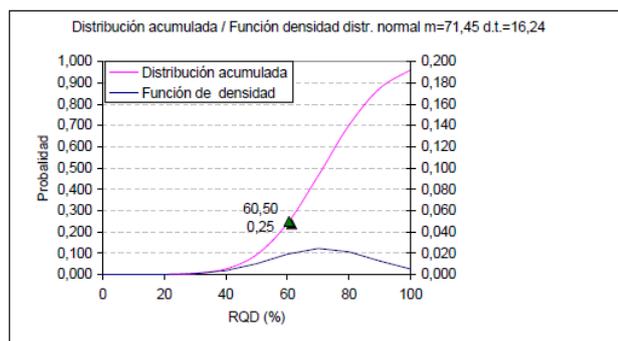
Para la segunda parte del viaducto, se tomaban como valores de cálculo los correspondientes al cuantil 25% de las curvas de frecuencia acumulada, confeccionados con los datos obtenidos en la campaña complementaria de sondeos. Estos valores corresponden a una RCS= 22,60 MPa y a un RQD= 60,5%.

GRÁFICA DENSIDAD DE PROBABILIDAD Y DISTRIBUCIÓN ACUMULADA PARA DISTRIBUCIÓN NORMAL $m = 28,31$ $\sigma = 8,37$ A PARTIR DE TABLA ANTERIOR



(Dato señalado con triángulo: valor de la RCS en el percentil 0,25)

GRÁFICA DENSIDAD DE PROBABILIDAD Y DISTRIBUCIÓN ACUMULADA PARA DISTRIBUCIÓN NORMAL $m = 71,45$ $\sigma = 16,24$ A PARTIR DE TABLA ANTERIOR



(Dato señalado con triángulo: valor de la RQD en el percentil 0,25)

Con estos datos y aplicando los factores de seguridad recogidos en el Proyecto, han resultado unos empotramientos de 6,25 m para pilotes cargados con 6300 kN y de 7,5 m para los de 7000 kN.

6 COMENTARIOS RESPECTO DEL PLIEGO DE CONDICIONES

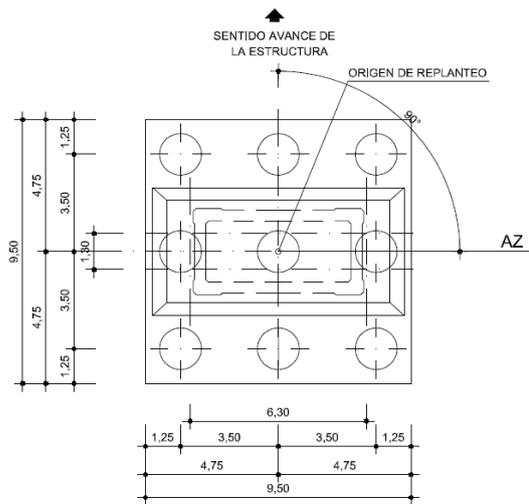
Se era consciente de que esta cimentación sobre un karst yesífero exigía un alto nivel de control, que obligaba a la toma de decisiones en obra, a través de la caracterización exacta del terreno - pilote a pilote – tanto con la información de la investigación complementaria como de los datos obtenidos en su propia perforación. Por ello, el Adif y el Proyectista ajustaron ligeramente el Pliego de Condiciones para trasladar a la obra la inquietud de garantizar un diseño y ejecución de una cimentación segura frente a la realidad kárstica actual de los terrenos y a su posible evolución en el corto y medio plazo. El Pliego inicial puede verse en la comunicación de F. Román a esta Jornada.

Los requerimientos finales de este Pliego se sintetizan a continuación:

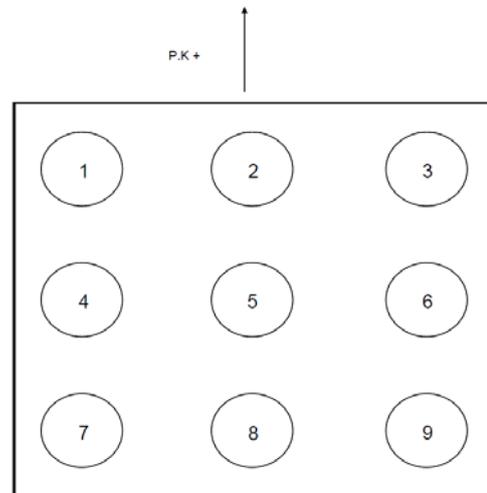
- Sondeos de comprobación y ajuste de dimensionamiento de longitudes del proyecto. Sellados a su terminación con presencia, a pie de sonda, de un geólogo para el registro y toma de decisiones en cuanto a muestreo y terminación.
- Presencia de un geólogo a pie de perforadora del pilote obra que confeccionará un parte de trabajo previamente establecido con datos de tiempos, entubaciones, terrenos perforados, velocidades, longitudes de armadura, agua, consumo de hormigón, sus variaciones en oquedades etc..
- La presencia de cavidades de detecta por el descenso del nivel de lodos impuestos en la ejecución del tramo en yesos. Retirada de la herramienta de perforación y relleno de la cavidad con mortero M-80 con 1% de bentonita hasta que la mezcla ascienda en la perforación por encima del techo de la cavidad. Espera de un plazo mínimo de 10 horas o el tiempo que la Dirección de obra determine para conseguir un mínimo fraguado del mortero y continuación de la perforación del pilote reperforando el mortero inyectado y a continuación el siguiente tramo de yesos hasta alcanzar la profundidad final.
- A medida que se generan los datos de la perforación, la Dirección de obra recalcula la profundidad del pilote con los criterios anteriormente expuestos.
- Control sónico a través de cuatro tubos metálicos soldados a la armadura
- En pilotes designados por la Dirección de obra y a través de los tubos sónicos se ejecutarían perforaciones verticales en el substrato, 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 substrato, se prolongarán de modo que, el espesor de roca sólida bajo la última intercalación blanda no fuera inferior a dos (2) metros.
- 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, mezclas y aditivos en las lechadas a usar y presiones límites a conseguir.
- En los pilotes de la mitad final del viaducto, en yesos de menor karstificación y de menor longitud final, se ha dispuesto una inyección de tipo IRS con tubos manguito (en un total de 6 m bajo la punta) para aumentar la seguridad al cerrar cualquier vía de posible disolución futura bajo dicha punta. El número de episodios de inyección vendría condicionado siempre por alcanzar una presión límite de 15 bares.

7 DOS EJEMPLOS DE PILAS CON ACTUACIONES ESPECÍFICAS

7.1 PILOTE SINGULAR EN UN PALEORELIEVE DEPRIMIDO EN LA PILA 30.



PLANTA DE CIMENTACIÓN
ESCALA 1:100



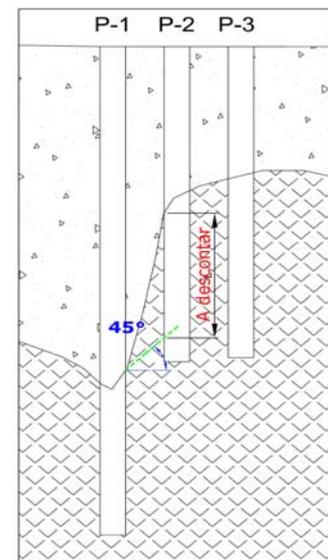
NUMERACION DE PILOTES

En la pila 30 se ha comprobado, al realizar los pilotes 4 y en menor escala el 8, que la profundidad donde se detectan bajo el aluvial los yesos masivos (unidad en la que se comienza a contar la resistencia por fuste en los pilotes), es sensiblemente mayor que la de los pilotes adyacentes. Esto implica una disminución en la resistencia por fuste del pilote 1, y de la resistencia por fuste y punta de los pilotes 5 y 7, al no tener confinamiento por uno de sus laterales.

Ante la necesidad de mejorar las características geomecánicas del sustrato aluvial que rodea a estos pilotes y conseguir confinar lateralmente el sustrato yesífero, se ha decidido la ejecución de columnas de suelo cemento con la técnica del Jet Grouting.

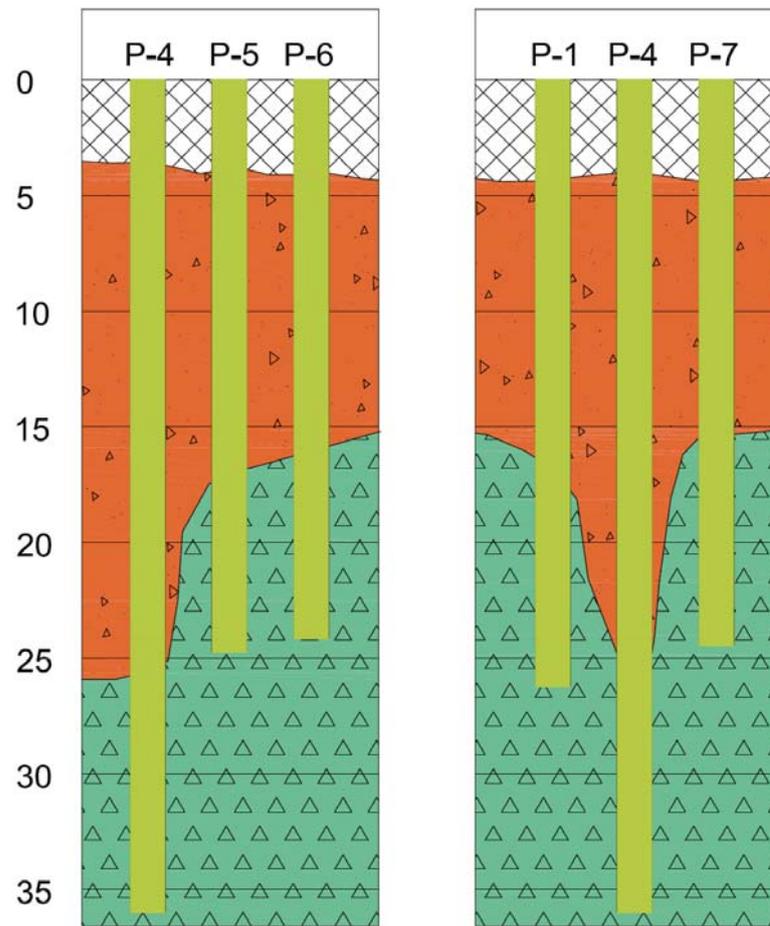
Debe decirse que en el planteamiento inicial entre proyectista y Dirección de obra, pensando en las irregularidades del techo del sustrato yesífero, una de las consideraciones de partida necesarias para la aprobación de los pilotes, era la comprobación del confinamiento lateral del tramo rozante de cada pilote, que venía dado por el esquema adjunto (la numeración de pilotes es genérica), en el cual se fija una pendiente del techo del sustrato de 45° como límite superior para considerar la resistencia por fuste.

Si al perforar un pilote aparecía el techo de los yesos "rozantes" a mayor profundidad que en uno próximo ya ejecutado, la parte del estrato por encima de la línea a 45° del esquema no será efectiva a la hora de proporcionar el rozamiento necesario para desarrollar la resistencia por fuste y se deberá despreciar en el cálculo de la carga resistida en el pilote afectado.



Esta situación es la que se ha presentado en el encepado de la pila 30, al realizar los dos últimos pilotes, el 4 y el 8, sobre una depresión en el techo del sustrato yesífero.

A continuación, partiendo de los partes de perforación, se muestran los cortes geológicos por los pilotes 4, 5 y 6 y por los pilotes 1, 4 y 7. Los primeros 3-4 metros están constituidos por un relleno antrópico bajo el que está el aluvial del Cigüela.



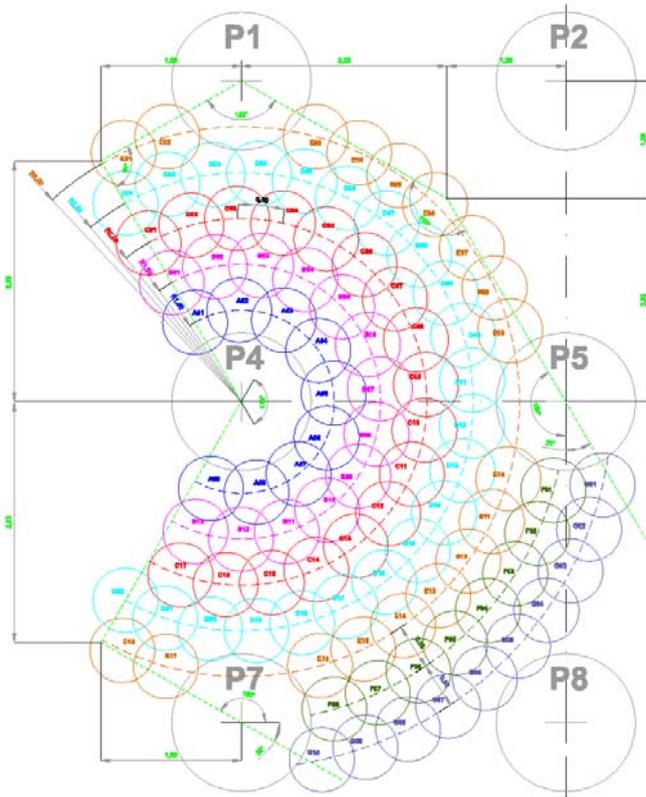
Profundidades medidas desde boca de entubación

De acuerdo con estos cortes, la afección a la resistencia por fuste y punta de los pilotes 1, 5, y 7 se refleja en la siguiente tabla:

	Techo de yesos horizontal		Techo de yeso deprimido en Pilotes 4 y 8	
	Carga resistente por		Carga resistente por	
	Fuste (t)	Punta (t)	Fuste (t)	Punta (t)
Pilote 1	395,0	305,0	182,7	305,0
Pilote 5	395,0	305,0	104,0	Empotramiento insuficiente
Pilote 7	395,0	305,0	52,2	

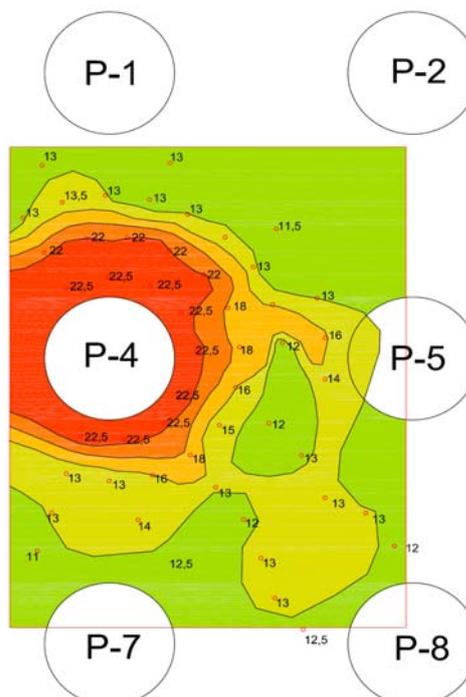
De aquí la necesidad de realizar un tratamiento con el que se consiga mejorar las resistencias por fuste y punta de los pilotes afectados, que se ha materializado en un tratamiento con columnas de jet-grouting tipo 1 alrededor del pilote 4, estimándose un diámetro de la columna de 70 cm. El jet penetró un mínimo de 1m en el sustrato yesífero.

Las columnas se dispusieron con la distribución que se define en el croquis siguiente que a su derecha muestra una fotografía del equipo usado.



Los taladros se perforaron por filas circulares a partir del pilote 4 y en función de la profundidad del sustrato yesífero que fue detectándose, la Dirección de Obra determinó los taladros de las filas siguientes que iban dejando de ser necesarios.

En las proximidades de los pilotes 1, 2, 5, 7 y 8, el sustrato se detectó hacia los 13 metros mientras que alrededor del pilote 4 apareció a 22,50. Representando gráficamente las profundidades del techo de los yesos se obtiene la figura siguiente que indica la existencia de una depresión, por disolución, quizás a modo de sumidero, en torno precisamente del pilote 4.

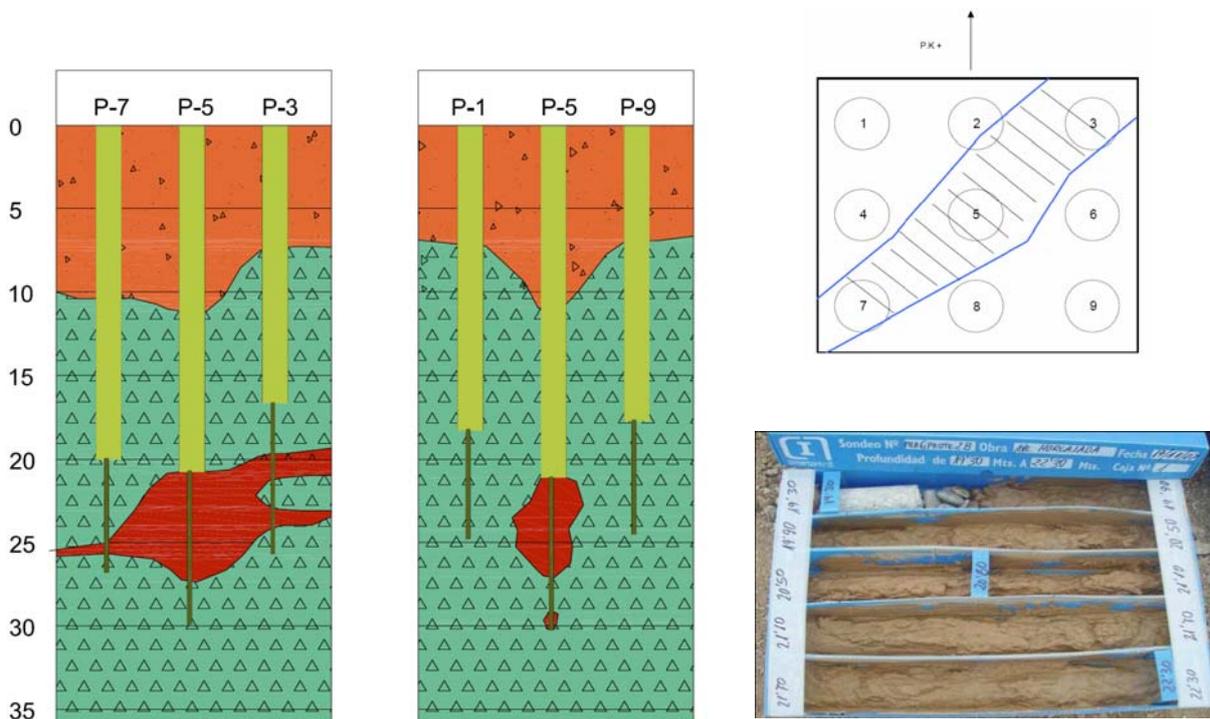


7.2 PILOTES CON CAVIDADES BAJO LA PUNTA, PARCIALMENTE RELLENAS CON ARCILLAS FANGOSAS.

En algunos sondeos realizados por los tubos sónicos de la pila 6 se han detectado cavidades rellenas parcialmente con fangos y arcillas.

En el caso de esta pila, dada la magnitud de los huecos detectados, el contratista planteó la dificultad de que las inyecciones convencionales - descritas en el pliego de prescripciones del proyecto - colatasen los huecos y cementasen los rellenos blandos de una manera eficaz con la que se garantizara la seguridad de la cimentación bajo las premisas exigidas por el Adif. Se planteó la ejecución de una alternativa de columnas de suelo cemento con la técnica del jet-grouting. Se usó un jet-grouting tipo 1 para aprovechar los tubos sónicos de 4" dado que la planificación de obra hizo que el encepado comenzara a ser ejecutado antes de la verificación total de las puntas de los pilotes.

La cavidad detectada es la indicada en el esquema de los cortes diagonales y de la planta siguientes:



En color rojo se ha señalado la oquedad, la cual puede estar vacía o rellena con arcillas fangosas. De hecho en el pilote 2 (no incluido en los cortes) el relleno ocupaba toda la cavidad, como se muestra en la caja del sondeo que se adjunta.

La existencia de hueco y de un relleno muy blando supone una dificultad para que se forme la columna de suelo-cemento pues, evidentemente el "suelo" o no existe o es demasiado fangoso. Si la columna de jet no se forma o no consigue tener continuidad inmediatamente desde la base del pilote, deja de tener sentido. Por lo tanto, en primer lugar se realizó un relleno de las cavidades con inyección de mortero hasta que se verificaba que comenzaba a subir por el taladro en el tramo "pilote". Posteriormente se continuó con el tratamiento con jet-grouting. La dosificación del mortero de inyección era baja en cemento de forma que el jet pudiera posteriormente movilizarlo y remodelarlo.

Se realizó el procedimiento siguiente, usando dos de los tubos sónicos de cada pilote:

Inyección con mortero de los taladros del pilote 7 por ser aquellos en los que la cavidad parece estar a menor cota. A continuación se realiza una inyección con mortero por el taladro 5-B, esperando 12 horas, seguido de una inyección por los taladros restantes, salvo el taladro 5 -A que ha sido usado para el tarado del alcance de estas inyecciones. Una vez verificado que el mortero de las demás inyecciones alcanzaba completamente a este taladro, se realizó la inyección de mortero por dicho taladro 5-A para completar el proceso.

En la fotografía adjunta se muestra un momento de la inyección de mortero.



Una vez realizado el tratamiento anterior, se perforaba con la batería del equipo de jet, el tramo amortorado verificando que no había discontinuidad entre el techo de la cavidad y el mortero de relleno. En caso de que hubiera, se repetía el proceso anterior de inyección de mortero. La perforación llegaba hasta penetrar un metro en la base de la cavidad. Si no había discontinuidades en el tramo amortorado, se ejecutaba la columna de jet.

La secuencia de tratamiento implicaba realizar primero, como es obvio, las columnas a través de uno de los tubos de los cuatro pilotes y tras una espera de 24 horas, se realizaba la de los demás tubos.

8 COMENTARIOS FINALES

Se ha querido exponer aquí la forma de trabajar conjunta de la Dirección de obra de Adif, de su Asistencia técnica, del Proyectista y del propio Contratista, para conseguir una garantía de una buena cimentación en un terreno de difícil caracterización, como lo son estos yesos karstificados, y con posibilidades de alguna evolución en el tiempo.

En primer lugar debe mencionarse que en la etapa de proyecto se estableció un diseño de la cimentación que venía inexorablemente acompañada de una detallada descripción de lo que había que hacer en la fase de obra, desde los reconocimientos complementarios hasta la redacción de un procedimiento de ejecución y de control de éste que hacía viable el diseño elegido.

En segundo lugar, ya en la fase obra, la Dirección de obra se ha preocupado de, manteniendo los criterios del proyecto, ajustar el procedimiento de ejecución de la cimentación a la luz de los reconocimientos complementarios e, indudablemente, de la constatación de los plazos de obra disponibles y de los equipos del contratista.

En tercer lugar, los resultados de la aplicación de los procedimientos a las perforaciones en ejecución ha motivado una continua puesta a punto de los mismos y ha exigido un permanente control y presencia a pie de los equipos.

Finalmente, se han llevado a cabo los tratamientos requeridos para garantizar la resistencia por el fuste y la punta en los casos necesarios.

En esta comunicación, se han expuesto los principios y metodología seguidos. En la mayor parte de las pilas debe decirse que el hecho de haber establecido la Dirección de obra, a priori, el procedimiento para definir las longitudes de los pilotes y su aceptación, ha permitido llevar un control ordenado y efectivo de la ejecución. En las pilas con singularidades se han analizado los factores que intervenían en el diseño, se han realizado cuantas investigaciones se han considerado como necesarias y se han llevado a cabo los tratamientos que garantizan la resistencia requerida del terreno. En esta comunicación se han mostrado dos ejemplos de estas pilas describiendo las operaciones realizadas en cada una.