

# EMPLEO COMBINADO DE JET-GROUTING Y MICROPILOTES PERFORADOS CON ROTOPERCUSION

## CIMENTACION DEL PUENTE DEL RIO MIERA EN SOLARES, CANTABRIA

Alfredo Muelas Peña y J. Javier Garcés Catalán\*  
Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

**L**a construcción de un viaducto sobre el río Miera como parte de la autovía del Cantábrico en la CN-634, tramo Solares-Sobremazas, ha requerido que una parte de la estructura se apoye sobre cimientos construidos a base de pilotes de diferentes profundidades y diámetros. Precisamente fue la cimentación del estribo de la margen derecha, la que precisó un diseño especial dada la singularidad del subsuelo portante. La mitad del mismo (calzada izquierda) se apoyará sobre pilotes de diámetro 1.500 mm., y la calzada derecha (independientes entre sí) lo hará sobre micropilotes de diámetro 312 mm.

Aunque morfológicamente se trata de una superficie horizontal sin ninguna discontinuidad externa manifiesta, la realidad del subsuelo, investigada a base de sondeos mecánicos, daba información muy dispar del mismo. La fórmula constructiva empleada en la cimentación de una parte del estribo ofrece la singularidad de superponer dos métodos de ejecución de cimentaciones para poder lograr el objetivo final, esto es, la construcción de micropilotes que soporten el estribo. Hemos aunado la técnica del jet-grouting con los micropilotes perforados en roca, siendo el primero un recurso auxiliar para lograr acabar los segundos. Este es el tema central de la comunicación que ahora presentamos.

### 1. Planteamiento de la obra

Como parte de la cimentación de un estribo sobre el que apoyará el viaducto que salva el río Miera a las afueras de Solares (Cantabria) y formando parte de la autovía del Cantábrico, se planteó la necesidad de perforar hasta una profundidad comprendida entre 22 y 24 metros, a fin de construir unos micropilotes con 170 ton. de capacidad portante. La fórmula utilizada para la otra mitad del estribo (calzada izquierda) no fue operativa en éste debido, exclusivamente, a la heterogeneidad litológica. En efecto, se intentaron perforar pilotes de Ø 1.500 mm. usando fórmulas convencionales de ejecución, tales como hélice con entubación simultánea acompañada, eventualmente, del uso de trépano, constatando día tras día que los avances eran mínimos y que, además, la seguridad del equipo perforador corría cierto peligro al producirse hundimientos repentinos del suelo sobre el que se apoyaba la máquina. La perforación se iba encamisando simultáneamente al avance, pero llegado a una cierta profundidad, el descenso de ésta no era posible por encontrar roca dura. Además, la cantidad de escombro producido durante el avance era muy copiosa, debido a que estaba sobre un aluvial arcilloso saturado de agua. Como consecuencia de esa circunstancia, la estabilidad de las paredes era muy precaria y su evacuación provocaba una afluencia del mismo al pozo que, a su vez, producía una subsistencia en las proximidades del orificio. El mal comportamiento del terreno unido a la dificultad de su

\* GEOCISA (*Geotecnia y Cimientos, S.A.*)

W

E

PERFIL GEOLOGICO ESKEMATICO BAJO EL ESTRIBO DE LA MARGEN DERECHA

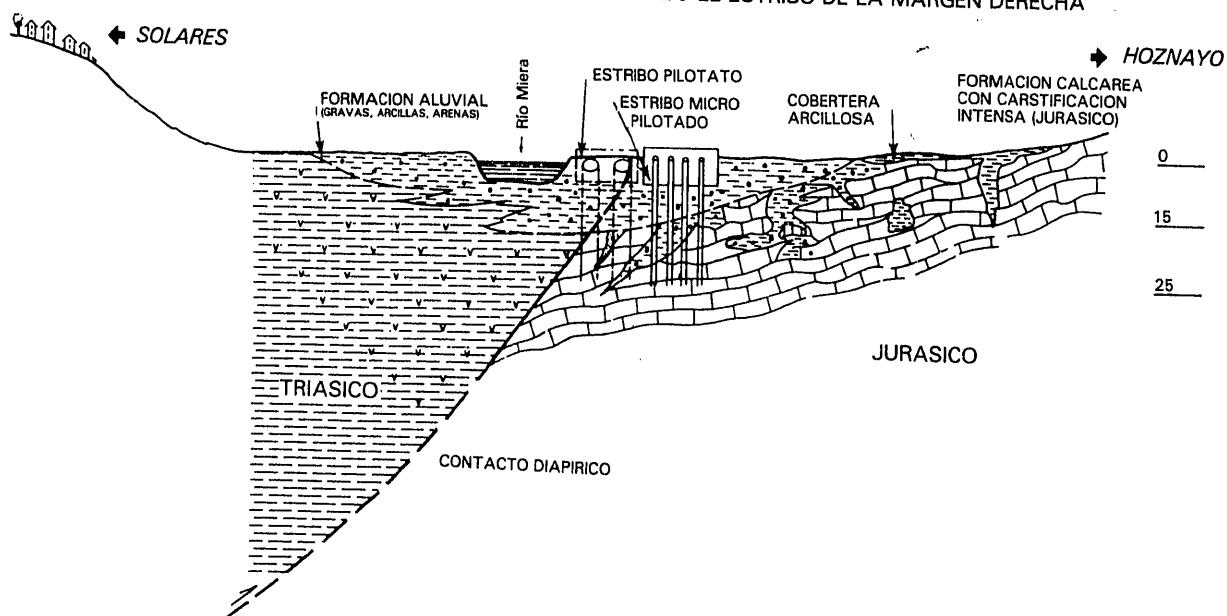


Figura 1.

perforación, usando el mismo tipo de equipos que los empleados para el resto de las pilas y para la otra parte del estribo, hizo aconsejable buscar otro sistema que, logrando idéntico objetivo, requiriera perforaciones de menor diámetro. Con esta premisa se pasó del ø 1.500 mm. (en pilotes) a ø 312 mm. (en micropilotes) y se aumentó el número de unidades de ocho (pilotes) a cuarenta (micropilotes).

## 2. Marco geológico

Para tener un conocimiento preciso del subsuelo que soportaría la estructura del puente, se hicieron sondeos a testigo continuo en los puntos que ocuparían las pilas y el estribo 2. En este último fueron varias las perforaciones efectuadas, dada la extraordinaria heterogeneidad que se apreciaba de un punto a otro situado a menos de 2 metros de distancia. Al margen de contactos estratigráficos-tectónicos entre formaciones de distinta edad (Triásico-Jurásico Inferior), era dentro de una misma unidad formacional donde se producían discontinuidades litológicas provocadas, esencialmente, por la acción del agua actuando sobre las calizas subyacentes. Por otro lado, el hecho de encontrarnos sobre un borde aluvial añade un factor más de distorsión al terreno objeto del trabajo (fig. 1).

La distribución lentejonar de las formaciones aluviales con espesores desiguales, unida a los cambios laterales de facies, suponen una imposibilidad de extrapolación o interpolaciones entre puntos próximos. Además, la circunstancia de que por debajo de la terraza aluvial existan calizas que están muy carstificadas, provoca que las grietas

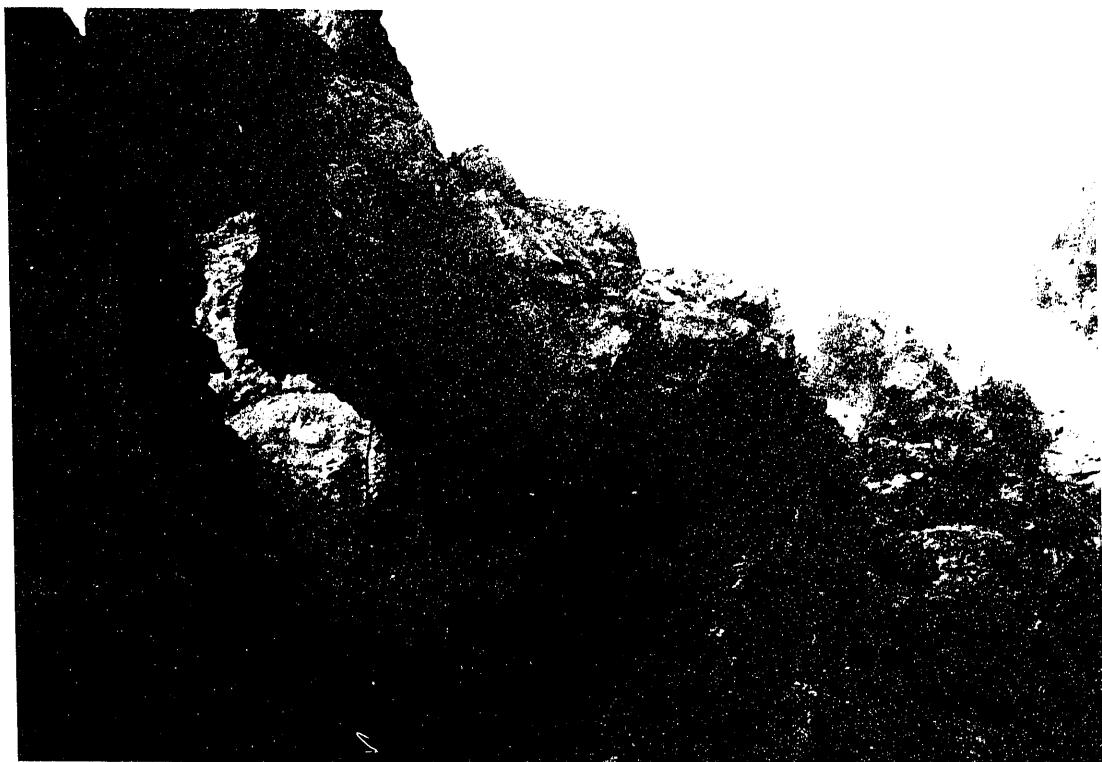
y huecos se hallen llenos de arcillas y/o gravas procedentes del nivel superior. A poca distancia del estribo (< 30 m.) y siguiendo la traza de la autovía en dirección Bilbao, hay unos afloramientos de calizas (fig. 2) en donde se manifiesta con gran espectacularidad el avanzado estado de degradación por disolución en que se encuentran.

Cuando no afloran es porque se hallan tapados por una estrecha cobertura arcillosa producida por disolución de ellas mismas (Fig. 3). Eliminada ésta (1,5 metros), su aspecto asemeja a pequeños menhires flotando sobre un lecho arcilloso rojo. A medida que se excava, el contenido en arcilla va disminuyendo y cediendo paso a la caliza oquerosa con cavidades vacías o llenas del mismo material (caliza brechoides) o de arcilla únicamente.

La superposición de la formación aluvial, constituida por arenas, limos, gravas y bolos, sobre estas calizas carstificadas conforman un lecho portante muy heterogéneo en el que la sustentación de cualquier estructura requiere forzosamente recurrir a cimentación profunda a base de pilotes que se empotren suficientemente en roca sana.

En la mitad del estribo pilotado, los sondeos cortaron una formación de margas yesíferas de edad triásica. La concurrencia de paquetes de yesos más o menos masivos y con fenómenos de disolución asociados, obligaban a reconocer previamente mediante perforaciones con testigo continuo hasta qué cota debían llegar los pilotes. Era preciso asegurarse de que nunca se apoyarían sobre una zona alterada o alguna cueva en formación. Lateralmente, sin embargo, no apareció ningún lecho yesífero que denunciara su presencia.

*Figura 2.*



*Figura 3.*



## **El marco geológico de la fundación del puente era realmente complejo y su tratamiento, desde el punto de vista constructivo, era merecedor de una atención rigurosa pilote a pilote**

en esa parte del estribo. El origen diapírico de esta formación y, consecuentemente, su distribución anárquica, puede ser una explicación a esa ausencia. En cualquier caso, su presencia no habría añadido mucha más complejidad a la tarea de ejecución de la cimentación que nos habían encargado.

Con todo esto, el lector podrá concluir que el marco geológico de la fundación del puente era realmente complejo y su tratamiento, desde el punto de vista constructivo, era merecedor de una atención rigurosa pilote a pilote, porque no era posible marcar una norma general para el conjunto de ellos. El nivel freático, con referencia a la plataforma de cimentación, se encuentra a 3 metros de profundidad, y además, se ha atravesado algún acuífero colgado entre los 15 y 20 metros en el que el agua era templada. Esta circunstancia aporta un complemento a la capacidad disolutaria que en sí misma posee el agua. No hemos apreciado durante las perforaciones un incremento del grado de disolución de la formación carbonatada en función de la presencia o no de aguas termales. Tampoco recuperábamos trozos de roca con tamaño suficiente como para apreciar ese aspecto. Lo cierto es que el contacto Tectónico-Jurásico, era el responsable de ese termalismo puntual al igual que sucede en numerosos puntos de la comarca.

### **3. Sistématica de ejecución**

La alternativa discontinua y caótica entre terreno blando, con presencia de agua, y duro, indujo a los Proyectistas a sugerir un sistema de perforación lo suficientemente versátil como para adaptarse a las circunstancias de cada terreno en el menor tiempo posible. Esa premisa de partida marcó la utilización de un equipo de rotación-ropercusión con martillo en fondo movido por dos compresores que, en conjunto, aportaban 40 m<sup>3</sup> de aire a 17 Kg. de presión. En caso de que al perforar rotativamente fuera preciso el uso de lodos bentoníticos, se desplazó un equipo de fabricación e impulsión de este fluido.

#### **3.1. Perforación con martillo en fondo**

Se inició el micropilote perforando con un diámetro de 350 mm. procurando bajar con él lo más posible dentro del paquete superior aluvial (arcillas-arenas-gravas). Debido a la pronta aparición del agua, las paredes se colapsaban con rapidez, por lo que era preceptivo acudir a un revestimiento auxiliar de tubo de acero de diámetro 328/320 mm. A continuación, y por dentro de este encamisado, se introducía el martillo pero ahora con un tallante de diámetro 312 mm. Mientras tanto se empujaba con la máquina la entubación auxiliar para intentar hacerla descender un poco más y con ello llegar hasta las calizas. Esta maniobra, en la mayoría de los casos, no era efectiva porque se interponía algún lecho duro (bolo, gravilla gruesa o bloque aislado) que cortaba su avance. Llegábamos así a una encrucijada de difícil salida:

por un lado teníamos unas paredes inestables que se hundían, y por otro un encamisado que no descendía. La confluencia de ambas exigía la búsqueda de otras alternativas al sistema que estábamos utilizando, puesto que él solo era insuficiente para lograr concluir la obra.

#### **3.2. Perforación con lodos**

Puesto que había un tramo superior colapsable (arcillas con bolos), quisimos probar a ver si usando trícono con lodos bentoníticos lográbamos mantener las paredes el tiempo suficiente como para llegar a las calizas y, a continuación, revestir ese estrato. Dos problemas nuevos surgían entonces: a) la presencia de bolos duros imposibilitaban su rotura y/o desplazamiento por el trícono, con lo que no se podía proseguir; b) pérdida del fluido de perforación a través de discontinuidades en número y amplitud desconocida. El resultado era el mismo: imposibilidad de avanzar.

El encuentro con este tipo de eventos distorsionantes no es nuevo para los que nos movemos en el campo de las cimentaciones. Es por eso que acudimos al siguiente recurso, consistente en realizar una cementación auxiliar de la zona inestable para lograr su contención. Así procedimos en donde las circunstancias lo requirieron, pero también de esta forma se conseguía superar el problema. Nuevamente eran dos las circunstancias que lo impedían. Por un lado, la reperforación posterior del mortero de contención (a las 48 horas), no había conseguido su finalidad. Una simple interrupción centimétrica sin cementar era suficiente para que a su través afluiera agua y con ella viniera la arcilla. La unión de ambas era un detonante que al poco tiempo (< 1 minuto) actuaba: hundimiento por donde se hallase el corte. El segundo fenómeno que acontecía era la indefinición del consumo que podría admitir el micropilote. De un volumen teórico de 75-80 litros/metro, hemos alcanzado los 500 litros. Recuérdese que estamos en el tramo superior y no hemos llegado aún a las calizas. Advertimos que esta inyección se hacía, sin presión, a través de un tubo que se bajaba hasta el fondo de la perforación. El extremo superior se conectaba a una manguera que tenía el opuesto unido a la bomba de inyección sobre la que descargaba el camión hormigonera.

El binomio inyección de contención-reperforación ya lo habíamos empleado con buenos resultados en actuaciones precedentes en terrenos cársticos, pero aquí no estaba resultando efectivo. Se consumía demasiado mortero y se lograban pocos avances. El problema principal seguía (contener los 15 metros superiores) sin resolverse.

Un nuevo paso cualitativo había que dar y así lo consideró la dirección de obra. Hasta ese momento ninguno de los procedimientos habituales ahí utilizados habían logrado estabilizar el terreno detrítico superior, era preciso recurrir a algo diferente a lo hasta ahora experimentado con buen resultado en otros frentes de obra provistos de marcos geológicos similares, pero que aquí no demostraban su eficacia a la hora de sujetar las paredes de la perforación.



#### 4. Solución adoptada

Se propuso entonces introducir la fórmula mixta de hacer jet grouting en el estrato blando (los 15 metros superiores) para, después, reperforar esas columnas y llegar hasta el final del pilote ya en calizas sanas. Si en éstas se constataba la existencia de espacios vacíos, o rellenos de arcillas, también se inyectaba ese tramo.

Así empezamos a actuar en todos aquellos micropilotes que aún no habían sido revestidos con encamisado auxiliar hasta la roca. Se construyeron columnas con lechada de cemento en 30 micropilotes; en 21 de esos taladros se efectuó, además, inyección a través de las calizas carstificadas y sólo en 9 fue suficiente con la contención del terreno aluvial sin precisar tratamiento las calizas inferiores (fig. 4).

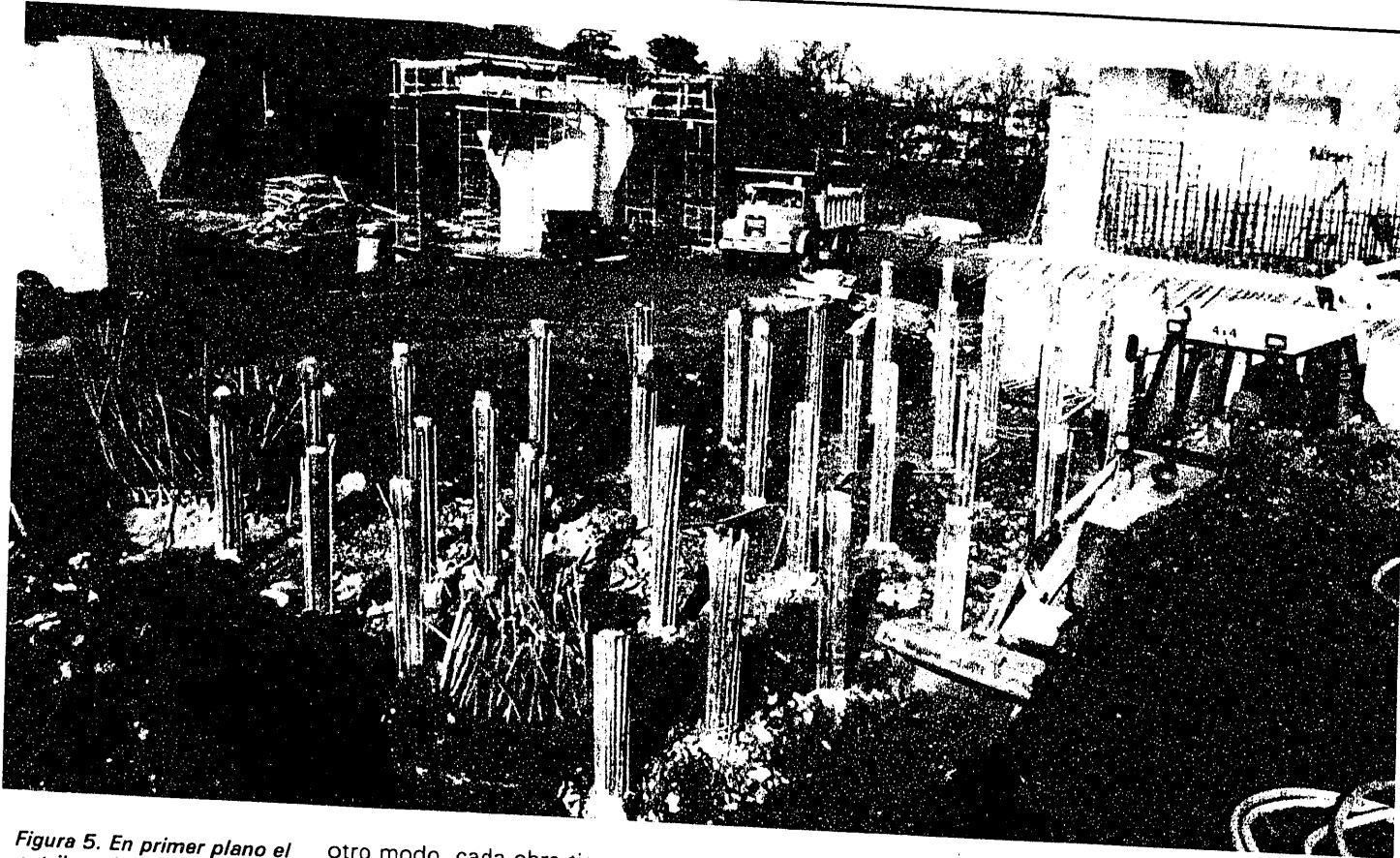
Los resultados obtenidos tras este nuevo proceso fueron definitivos. A partir de ahí las reperforaciones de las columnas, realizadas con martillo en fondo y a diámetro 312 mm., lograron sobrepasar sin incidentes la zona conflictiva y llegar hasta su cota. Los diámetros de las columnas de jet, sin ser homogéneos, sí superaban los 350 mm. y, como la verticalidad de la reperforación estaba garantizada por la rigidez de la sarta de

corte, no se produjeron roturas en las columnas ni, consiguientemente, nuevos accesos de agua y arcilla durante el avance de la perforación. Un valor añadido a este procedimiento era, además, el bajo consumo de mortero que, a partir de ese instante, admitían los micropilotes cuando se hacía la inyección final.

Tras ejecutar las diferentes fases de tratamiento de consolidación del terreno, tanto en el estrato blando e inestable superior, como en las calizas carstificadas inferiores, se terminó el micropilote introduciendo la armadura tubular de 180/150 mm. seguida de una inyección de mortero de 300 Kp/cm<sup>2</sup> de resistencia característica. El tiempo transcurrido en esta segunda fase (después de acudir al apoyo del jet grouting) hasta acabar las 30 unidades previstas, fue de 25 días, mientras que en las operaciones previas hechas por procedimientos clásicos, el tiempo empleado hasta lograr finalizar 10 unidades fue superior y con elevado consumo de mortero de relleno introducido en fases sucesivas (alguno de los taladros requirieron hasta 5 rellenos, y sus siguientes reperforaciones posteriores).

Así ha concluido esta obra de recalce que en sí mismo puede considerarse como un «prototipo» por las circunstancias constructivas que sobre ella han concurrido. La realidad es que, de uno u

*Figura 4. El equipo perforador con martillo en fondo está a la derecha; el de jet grouting se sitúa a la izquierda. Cada uno se halla en plena actuación simultánea.*



**Figura 5.** En primer plano el estribo micropilotado. En el ángulo superior derecho se halla la otra mitad del mismo (ésta pilotada) con su encepado en construcción.

otro modo, cada obra tiene una singularidad que la diferencia de otras parecidas. Simplemente hemos logrado resolver un problema de cimentación en un lugar en el que los procedimientos convencionales de ejecución no eran los adecuados.

### 5. Construcción del micropilote

Una vez conseguida la estabilización del agujero perforado, se introducía una armadura de tubo roscado de acero ST-52 y ø 180-150 mm. en tramos de longitud próxima a los 6 m. Se dejaba apoyado en superficie y nunca en el fondo. Previo a la inyección del mortero resistivo, se hacía un barrido de limpieza con aire comprimido que, además, nos avisaba de alguna obstrucción que hubiese quedado entre el tubo y la pared del taladro («cuello» de arcilla p.e.). Pasada esa etapa se iniciaba la introducción del mortero final que entraba por dentro del tubo-armadura. El suministro se hacía por medio de camiones hormigonera que lo transportaban desde planta. Vertían éstos directamente en una bomba SEBHS que era quien lo impulsaba hasta destino.

Lleno el orificio, como refuerzo estructural, se introducía una armadura a base de 8 redondos de ø 20 y 4 m. de longitud.

En la figura 5 se muestra una panorámica de los micropilotes antes de proceder a construir el encepado. Entre ellos pueden apreciarse dos pilotes de mayor diámetro que tuvieron que ser abandonados por imposibilidad en su realización por el método tradicional que se estaba empleando.

La sección del micropilote acabado viene dibujada en la fig. 6.

### 6. Datos comparativos

Para ilustrar la eficiencia del método empleado en la resolución de esta cimentación, basten algunos datos cuantitativos:

■ En los micropilotes en que no se construyeron «columnas» (10 unidades), fueron precisas hasta tres inyecciones de mortero de relleno para sujetar el tramo superior aluvial (de unos 15 metros). La reperforación de ese mortero de contenido supuso repasar hasta dos veces y media (promedio) la longitud inyectada.

■ El consumo teórico de mortero introducido (incrementado en un 20 %) en los 236 m. de micropilote no tratados con jet grouting sería de unos 22 m<sup>3</sup>, lo que supone un 1.023 % de aumento.

En las unidades tratadas previamente con jet grouting (30 unidades) hay que hacer un desdoblamiento. Por un lado irían aquellos micropilotes que tuvieron un tratamiento parcial de jet grouting y que llegó hasta los 15-17 m. de profundidad; se estabilizaba únicamente el terreno aluvial colapsable. En total fueron 8 unidades con 133 m.l. tratados y 67 m.l. sin tratar (calizas).

Otro grupo lo formarían aquellos que fueron íntegramente tratados, esto es, los 24-25 m. totales de micropilote. En conjunto suman 506 metros distribuidos en 22 micropilotes.

Analizando los consumos post-tratamiento, observamos claramente el óptimo resultado, tanto por la disminución de volumen admitido, como por la reducción de tiempos empleados en las tareas de ejecución. Esquemáticamente representa-

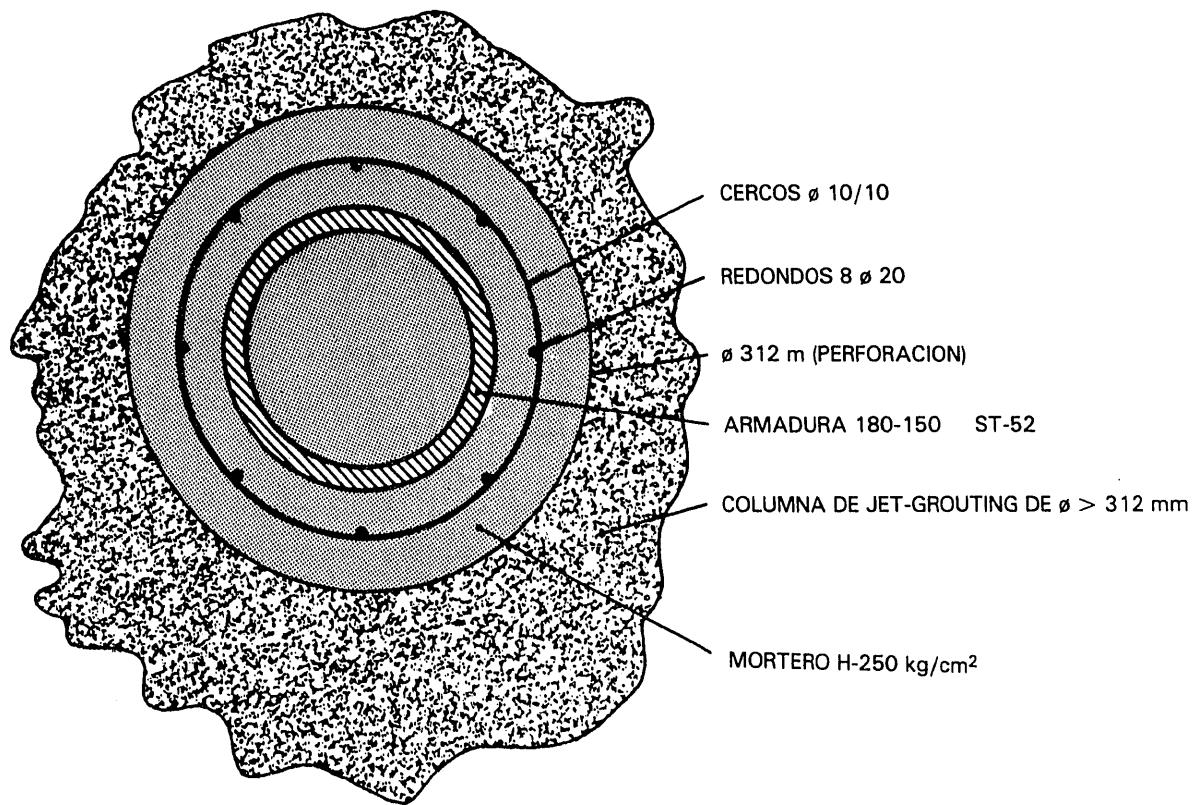


Figura 6.

dos estos datos quedan tal como expresamos en el cuadro I.

Como es habitual, sobre estos promedios generales siempre surge alguno o varios que son la excepción. Es el caso, por ejemplo, de un micropilote de 30 metros de longitud que requirió 57 m<sup>3</sup> de mortero en varias tandas aun habiendo sido tratado con Jet Grouting en los 20 m. primeros. Para lograr concluirlo se precisaron hasta 11 reperforaciones de otras tantas inyecciones de mortero previas. Hay algún otro ejemplo con sello de originalidad, pero eso es lo usual en cualquier obra de estas características. El subsuelo carbonatado «aderezado» con tectónica diafírica

y «adornado» con fenómenos de disolución carbonática, admite cualquier variación a una pauta de comportamiento previamente imaginada. Nuestra experiencia ha sido para ese lugar concreto y provocada por unas características singulares de esa parte del estribo. Su extrapolación a otro lugar, probablemente no puede hacerse en bloque porque allí acontezcan otras peculiaridades que lo diferencien del ahora experimentado.

Pretendemos únicamente constatar que, aunque económicamente pudiera pensarse en un sobrecosto importante de superposición de dos fórmulas de cimentación con equipos humanos y mecánicos diferentes, la reducción de tiempos y de consumos de mortero de contención y resistivo, ha hecho rentable el trabajo.

Cuadro I

	M.L. M.L.	M.L. de columna J-G	M <sup>3</sup> de mortero consumido	Consumo por m.l. de micropilote	% de exceso sobre el teórico	Promedio de actuaciones en un mismo micropilote (perf-reperf.)
Micropilotes sin enclavamiento previo (10)	236	—	225	953 litros	1.023 %	5,6
Micropilotes con tratamiento parcial (8)	200	133	70	350 litros	380 %	3
Micropilotes con tratamiento integral (22)	506	506	94	185 litros	205 %	2,1

#### Bibliografía

- Molera González R.; Plaza Marco A.; Fernández Fuentes J. R.: «Pilotaje en un macizo rocoso karstificado». VII Simposio Nacional «Obras de superficie en Mecánica de Rocas». Madrid, diciembre 1982, Tomo I.
- Muelas Peña A.; Walliser Bauset J.: «Aplicaciones de la rotopercusión en obras de ingeniería civil: pilotes y péndulos». Revista de Obras Públicas. Abril 1984.
- Muelas Peña A.; Garcés Catalán J. J.: «Pilotaje en formaciones rocosas con perforadoras mixtas (rotación-rotopercusión)». Simposio sobre Mecánica de Rocas y Centrales Energéticas. Madrid 1988, pp. 85-93. ■