

Aplicaciones de la rotopercusión en obras de ingeniería civil: Pilotes y Péndulos^(*)

Por ALFREDO MUELAS PEÑA

Geólogo

JORGE WALLISER BAUSET

Perito Industrial

El objetivo de esta comunicación es dar a conocer la experiencia de Geotecnia y Cimientos, S. A., en la utilización del sistema mixto rotopercusión-rotación en la ejecución de un determinado tipo de obras que, por sus especiales características, no eran abordables por procedimientos clásicos del mismo, la perforación, dejando para posteriores trabajos el análisis pormenorizado de cada una de las etapas de que consta la obra en cuestión.

1. BUSQUEDA DEL SISTEMA

La realización de perforaciones para apoyar estructuras u obtener datos del subsuelo siempre se encuentra sometida a limitaciones cualquiera que sea el sistema utilizado en su realización. Las características geotécnicas del emplazamiento, o las especiales circunstancias del proyecto son las que imponen unos condicionantes limitativos a la hora de seleccionar el equipo y método más adecuado para la correcta ejecución.

En los tres últimos años se nos presentaron una serie de casos singulares cuya resolución por sistemas convencionales de perforación suponía el empleo de mucho tiempo con el consiguiente sobrecosto de la obra. La reiteración de obras que precisaban perforaciones de diámetros y profundidades no usuales indujo a Geotecnia y Cimientos, S. A., a buscar un equipo lo suficientemente versátil como para ser capaz de abordar trabajos de perforación específicos cuyos límites de diámetro estarían entre 150 y 400 mm., y la profundidad a alcanzar fuese entre 15 y 35 metros. Dicho equipo no tendría que estar condicionado por las específicas características litológicas del subsuelo sino todo lo contrario. Debería ser susceptible de trabajar en los medios más heterogéneos que puedan darse, desde granito sano a arcillas, pasando por cualquier tipo de formación multicapa.

Eramos conscientes, no obstante, que sea cual

(*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que podrán remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 30 de junio de 1984.

fuese el equipo elegido, su eficacia se daría en unas circunstancias concretas mientras que en otras los rendimientos se verían mermados.

Con estas premisas de partida comenzó la búsqueda y prueba de diferentes equipos y sistemas, llegando a la conclusión de que el que mejor se adaptaba era el que podía perforar indistintamente a rotopercusión con martillo en fondo y a rotación con tricono. La versatilidad del mismo y su rapidez introducía factores de reducción de costos de obra al rebajar el tiempo de la misma y no estar supeditado a variaciones litoestratigráficas.

2. FUNDAMENTO DEL METODO

El equipo en cuestión es una máquina perforadora sobre camión que trabaja a rotopercusión con martillo en fondo o a rotación con tricono siendo el aire en ambos casos el medio de circulación para evacuación de detritos. Cuando el material a perforar es competente (caliza, granito, areniscas, esquistos, etcétera), el instrumento de corte es el martillo en fondo. Se coloca éste en el extremo del tren de perforación y el aire comprimido, que circula por el interior del varillaje, acciona su pistón que, a su vez, hace percutir al tallante rompedor. No todo el aire se emplea en este cometido sino sólo una parte. La otra parte excedente se utiliza para limpieza del taladro. La eficacia de un martillo será tanto mayor cuanto más uniforme sea el comportamiento de la roca, no importando para ello que la dureza sea alta o baja. Sin embargo, las existencias de discontinui-

dades no selladas (diaclasas, cuevas, pizarrosidad, fallas, etcétera) introduce un factor retardador en el sondeo debido a la fuga del aire. Hay soluciones, no obstante, para resolver esta contingencia y algunas otras que suelen aparecer en prácticamente todas las obras.

Si el terreno es blando, el útil de corte es un tricono. Todo el aire en este caso se emplea para limpieza. Ahora es muy importante que el equipo, además de llevar un compresor de alta presión y elevado caudal, incorpore una cabeza de rotación con par suficiente como para actuar a diferentes diámetros (de 200 mm. a 400 mm.). La presencia de tramos duros, no excesivamente potentes (< 1 m.) no supone especiales problemas en la perforación, pero si lo fuere, se subsanaría pasando de tricono a martillo.

Como se ve, el sistema en sí es muy flexible y su puesta en marcha, en principio, no ofrece grandes dificultades. Lo que sí se requiere son importantes inversiones iniciales, tanto del equipo principal (perforadora), como de los útiles (barras, martillos, triconos, adaptadores, centradores, etcétera). El tiempo y la experiencia de cada obra nos ha obligado a nuevas incorporaciones de material auxiliar llegando así a reunir una amplia gama de ellos que hoy nos permite afrontar tareas diversas sin especiales preparativos.

3. CARACTERISTICAS DEL EQUIPO

Nos referiremos únicamente al equipo base, la perforadora, dejando al margen los diferentes útiles que, en cada caso, serán específicos para la obra a ejecutar.

El equipo en cuestión es una perforadora hidráulica, de torre abatible y cabeza de rotación deslizante, montada sobre camión. La perforadora es el modelo T₄ de la casa Ingersoll Rand siendo sus características principales:

Compresor: caudal, 20 m³, y presión, 17,5 kilogramos.

Rotación: velocidad, hasta 2.000 rpm., y par: 1.050 kg/cm.

Camión: longitud: 11 m., y anchura, 2,5 m.

Peso en orden de marcha 26 tm.

El camión lleva incorporado, además del com-

presor, un cargador sobre el que se alojan cinco barras de perforación de 7,6 m. de longitud cada una. Con este dispositivo se puede llegar a 38 m. de profundidad sin precisar ningún vehículo adicional. La incorporación de cada varilla no requiere un tiempo superior a los tres-cinco minutos, y el cambio de emplazamiento en pequeñas distancias supone unos diez minutos desde que se abate la torre hasta que comienza a perforar nuevamente.

La dotación precisa varía entre dos y cuatro hombres, dependiendo de las características del trabajo a realizar.

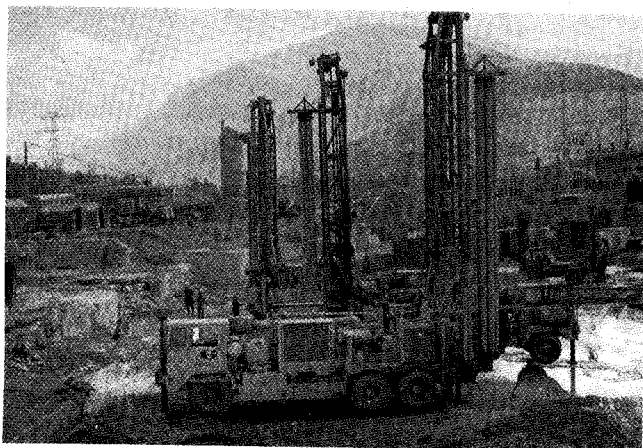
4. FORMAS DE EJECUCION

El comportamiento geotécnico del subsuelo casi siempre es quien marca la pauta a seguir a la hora de realizar un proyecto de cimentación sobre cualquier obra civil. Una vez elaborado este y comprobadas las dificultades o inoperancia de los sistemas convencionales de ejecución, puede acudir a la rotopercusión, pero eligiendo convenientemente el útil a emplear. En efecto, cada obra se desarrolla en un marco distinto y pretende objetivos diferentes. El trabajo de varios años nos ha proporcionado datos y experiencias que, debidamente analizados, nos permiten hoy dar rápida respuesta a cualquier contingencia que experimente el proyecto original o el mismo terreno.

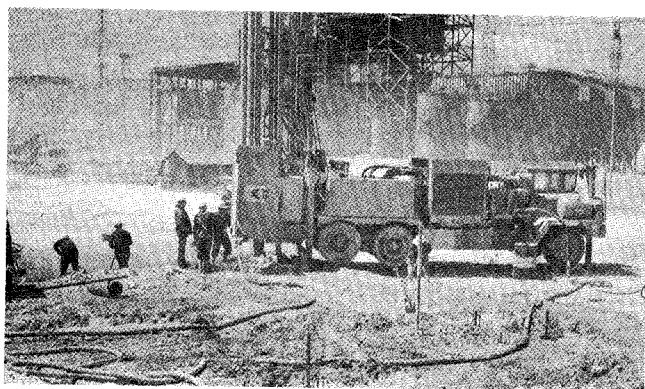
4.1. Perforación con martillo en fondo

Como se indicaba anteriormente, su óptima aplicación se da cuando el terreno a perforar es duro o hay alternancia duro-blando. La eficiencia del martillo es máxima cuanto mayor sea la homogeneidad del terreno, tanto en composición como en estructura. La afluencia de agua en pequeñas cantidades supone disminuciones de rendimiento al formarse «cuellos» de barro que dificultan la evacuación del aire y consiguiente limpieza del taladro. Utilizando espumante pueden mitigarse estos problemas en muchos casos, pero en otros (karst muy desarrollado), hay que acudir a procedimientos especiales. La velocidad ascensional mínima aconsejable para una correcta limpieza es de 3.000 pies/minuto en seco, y de 150 pies/minuto con agua.

Los martillos en fondo que utilizamos pertenecen a las casas Ingersoll-Rand, Misión y Atlas



Perforación de pilotes con martillo en fondo. Tres máquinas baten una de las plataformas de trabajo.



Perforación con el mismo equipo pero ahora a rotación y con lodos.

Copco, con una muy amplia gama de modelos (A53-15, A63-15, A100-15, DHD-112, DHD-24A y Cop42).

La perforación efectuada con martillo tiene una ventaja adicional en caso de sondeos profundos: la verticalidad. Puesto que para su funcionamiento no precisa empuje, las posibilidades de desvío quedan muy reducidas por muy inclinadas que estén las capas litológicas. Además, se le acoplan unos mecanismos correctores que añaden aún más seguridad a la trayectoria deseada.

Con todo esto, hay que añadir, no obstante, que existen limitaciones a su utilización en cuanto a diámetros se refiere. Las casas fabricantes los limitan en función de las profundidades a que haya de descender y del caudal de agua que pueda surgir; naturalmente, ello está condicionado por las prestaciones del compresor, en caudal y pre-

sión. Nuestra experiencia se ha movido entre $\varnothing$ 200 mm y $\varnothing$ 315 mm, aunque creemos posible llegar a perforar a 350 mm siempre que la profundidad no supere los 35 o 40 metros.

Por último, en el apartado de rendimientos no puede darse un valor fijo en razón de las múltiples variables que influyen. De todos modos puede confirmarse que fluctúa entre 8 y 15 m/h. en condiciones desfavorables y hasta profundidades medias de 30 metros.

4.2. Perforación con tricono

La aplicabilidad del mismo es aconsejable cuando el terreno a perforar es predominantemente detrítico y se presume la existencia de un paquete duro que se ha de atravesar. En efecto, el material detrítico (arena, arcillas, limos, etc.) suele ir acompañado de agua que provoca la inestabilidad del taladro al cabo de poco tiempo. En evitación de ello, la utilización de lodos es el medio más adecuado para sostenerlo hasta el momento del hormigonado. Cualquier máquina perforadora dotada de una potente cabeza de rotación, sería capaz de profundizar pozos con diámetros superiores a 350 mm, siempre que, naturalmente, dispusiese de las bombas de lodos adecuadas. De lo que ya no es tan capaz, o si lo es supondría una disminución considerable en su rendimiento, es de perforar intercalaciones rocosas con espesor y dureza variable que precise la utilización de martillo en fondo. Es aquí donde nuestro equipo toma ventaja al no precisar especiales preparativos para incorporar uno u otro instrumento de corte. En este caso, también hemos de señalar que su máxima optimización de uso se halla entre los diámetros 200 y 350 mm, llegando con ellos a profundidades entre 25 y 40 metros. Como fluido puede utilizarse espumante o lodos siendo el terreno quien decida uno u otro.

5. CAMPOS DE APLICACION

Una vez comprobada la versatilidad del sistema, hemos procurado aplicarlo en todas aquellas perforaciones en que concurrían especiales circunstancias (litológicas, geotécnicas, proyecto) y cuya ejecución por otros métodos sería más penosa y, consiguientemente, costosa.

Quede bien sentado que el sistema y forma de perforación referido no excluye a ninguno de los

ya existentes. Lo único que pretende es cubrir un campo que, día a día, se presenta con mayor frecuencia en distintas obras de ingeniería.

5.1. Pilotes

Es dentro de esta cavidad donde mayor incidencia ha tenido la aplicabilidad de la rotopercusión con equipos de perforación T-4. Las obras realizadas fueron numerosas, pero por su mayor entidad y especial singularidad nos referiremos únicamente a las llevadas a cabo en las centrales térmicas de Velilla de Río Carrión y Carboneras.

En Velilla del Río Carrión (Palencia) toda la Central se cimentaría sobre calizas con un *karst* muy desarrollado, lo que suponía contar con un sustrato rocoso muy heterogéneo a efectos de cimentación. Esta, y como consecuencia de lo anterior, se proyectó mediante zapatas apoyadas directamente en caliza, cuando era aflorante y competente, y mediante pilotes si la caliza no afloraba.

Esa litología calcárea estaba acompañada de arcillas y bolos, lo que hacía necesario perforar con algún sistema que fuese capaz de avanzar en las circunstancias más desfavorables, ya sea por el terreno, o porque la profundidad de empotramiento fuese considerable.

La sistemática generalmente seguida era:

- Perforación del taladro.
- Introducción de mortero y contención para estabilizar paredes si el taladro se hundía y no podía penetrar la armadura.
- Reperforación de este mortero a las cuarenta y ocho horas.
- Colocación de la armadura.
- Inyección del mortero estructural.

El proceso ha sido descrito pormenorizadamente en otro trabajo anterior (Molera, R.; Plaza, A., y Fernández, J. R.: «Pilotaje en un macizo rocoso karstificado». VII Simposio Nacional «Obras de superficie en mecánica de rocas». Madrid, 1982, tomo I), por lo que ahora solo lo haremos sucintamente:

Perforación: Se realizaba con diámetros comprendidos entre 200 mm. y 312 mm., según que las cargas a soportar por cada pilote fuera de 40 tm. o 170 tm. Siempre se utilizó martillo en

fondo. Las profundidades variaban entre 7 m. y 40 m., siendo 22 la media.

Mortero de contención: Su misión era sujetar paredes arcillosas que rápidamente se colapsaban, o taponar cuevas por donde se perdía el aire de barrido. Lo normal era una combinación de ambas. Se inyectaba desde el fondo hacia la superficie. Su resistencia era de 200 kp/cm². A las cuarenta y ocho horas de su colocación, ya podía reperforarse con óptimos resultados.

Esta etapa de relleno y reperforación no siempre era necesaria pasando entonces a introducir la armadura después de acabada la perforación. Dicha armadura estaba constituida por tubos de acero ST-52 y diámetros 180/150 y 90/71 mm. Se empalmaban en tramos de 7 m. por medio de roscas de filete cuadrado, calibrada con un error máximo de $\pm 0,01$, de forma que la sección del tubo, trabajando a compresión, se mantenía constante.

Tras una limpieza con aire y agua se procedía, por último, a inyectar, a través del tubo armadura, el mortero estructural (de 300 kp/cm²), dando por finalizado el pilote.

En total, se han hecho 767 pilotes que han precisado de 20.000 m. entre perforación y reperforación, y han consumido 8.500 m³ de mortero. Los equipos T-4 perforando eran cuatro, permaneciendo un quinto de reserva.

Los avances obtenidos fueron muy variables dependiendo, fundamentalmente, de la naturaleza del terreno. Así, se consiguieron medias de perforación entre 10 y 15 m/h. en caliza sana, 7 a 10 m/h. en tramos arcilloso-calcáreos, y 5 a 7 m/hora en rellenos de bolos con arcilla.

La otra cimentación realizada en el Parque de Carbones de la Central Térmica del litoral de Almería (Carboneras) también se hizo con el mismo equipo perforador, pero ahora funcionaba a rotación y con lodos a diámetro de 312 mm.

La disposición litológica en este caso era: un tramo superior de arenas, limos y alguna grava; un tramo medio conglomerático con espesor variable, y, finalmente, un nivel inferior de calcarenitas donde apoyarían los pilotes. El agua marina se cortaba a los 11 m. y, a partir de ese instante, se producían los desmoronamientos del taladro a medida que progresaba la perforación. Para atajar

todos estos condicionantes se previó la utilización del tricono, que rompería los tramos blandos, y martillo para el conglomerado. El uso de lodo sepiolítico se consideró indispensable durante todo el proceso de perforación, en caso de utilizar exclusivamente rotación.

Tras la realización de una prueba inicial con tricono, se observó que el atravesar el paquete de conglomerados no ofrecía especiales dificultades, por lo que, en lo sucesivo, solo utilizamos este instrumento cortante.

Para soportar los esfuerzos verticales se previeron dos tipos de armadura en toda la longitud del pilote:

- a) Para cargas inferiores a 24 ton. se usaron redondos de límite elástico $f_y \gg 4.200 \text{ kp/cm}^2$ centímetro cuadrado con distintos diámetros.
- b) Para cargas superiores (hasta 77 ton.) se utilizaron tubos de acero roscado de límite elástico $f_y \gg 3.600 \text{ kp/cm}^2$ con diámetros y espesores adecuados a las cargas.

Para resistir los esfuerzos horizontales, se han proyectado armaduras que se superponen a las anteriores, formadas por redondos de límite elástico $f_y \gg 4.200 \text{ kp/cm}^2$ en una longitud de 5 m. en la cabeza de los pilotes.

En este caso concreto, la perforación no utiliza

el compresor, valiéndose únicamente del cabezal de rotación. Como medio auxiliar se utilizaba una bomba de lodos Longyear 553, una turbomezcladora Bonne Esperance y una bomba de inyección de mortero.

Una vez finalizada la perforación y colocada la armadura, bien a través de ésta o por medio de un tubo auxiliar, se introducía un mortero de resistencia característica 175 kp/cm^2 que, a medida que ascendía, desplazaba al lodo.

El número final de pilotes ha sido de 108; la profundidad máxima alcanzada fue 35 m., siendo la media de 22 m.

5.2. Péndulos en presas

La instalación de estos dispositivos de control de presas es una medida precautoria que se toma cuando la entidad de la misma así lo aconseje. Habitualmente éstos se colocan durante el proceso de construcción, pero hay casos en que o no lo hicieron o desean aumentar el número de los ya existentes.

La exigencia que forzosamente han de cumplir es que la verticalidad sea prácticamente total, ya que, de lo contrario, el cable del péndulo rozaría en las paredes haciendo inútil cualquier medición.

Tradicionalmente, la perforación de los taladros se hacía con granalla o con sondas testigue-



Panorámica del equipo emplazado en coronación de una presa y en fase de ejecución de un péndulo de 100 m.

ras extrayendo testigo continuo. El procedimiento es lento (1 a 2 m/d.) y susceptible de desviaciones, tanto mayores cuanto mayor sea la profundidad, debido a la necesidad de aplicar empuje al varillaje. Ello trae consigo la comprobación continua de la verticalidad de la pérdida de tiempo que ello conlleva. En el caso de que la desviación se iniciase, el rectificado sería penoso. Si la magnitud de ésta llegara a un radio, la mejor solución consistiría en reiniciar el taladro ahora a mayor diámetro.

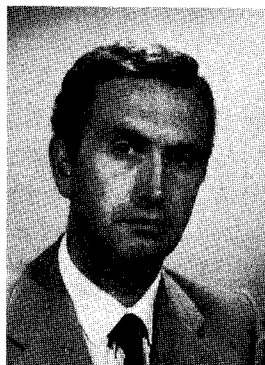
La piedra angular de esta actividad reside, pues, en conseguir una perforadora que funcione sin empuje, avance rápidamente y cuyos útiles aporten suficiente rigidez como para evitar desviaciones. Todos estos requisitos son precisamente los que reúne el equipo objeto de esta comunicación. Existe, sin embargo, una limitación y reside ésta en la forma de la presa. En efecto, la perforadora solamente puede realizar sus trabajos situándola en coronación, debido a sus dimensiones. Lógicamente, al ser obligado este emplazamiento, el taladro tendrá que atravesar todo el cuerpo de presa hasta llegar a su cota última, o sea, hasta empotrarse en roca los metros precisos. No siempre ello es posible, dada la variedad de tipos y formas de las presas; en las de tipo bóveda de gran altura, por ejemplo, los péndulos situados en el eje no suelen ser factibles. A medida que nos acercamos hacia los estribos, esta contingencia desaparece.

Utilizando martillo en fondo y diámetros de 220 mm., Geotecnia y Cimientos, S. A. ha realizado una campaña de perforación en numerosas presas, obteniendo resultados francamente positivos. La media diaria ha sido de 50 m., llegando a hacer taladros de hasta 120 m. con un desvío final máximo de 60 mm. Es muy conveniente que la perforación atravesase galerías de observación, siendo en cada una de ellas donde se comprueba la verticalidad del taladro y donde pueden efectuarse rectificaciones en la trayectoria, caso de haber desvío. Obviamente, el equipo ha sido provisto de unos medios adicionales que garantizan, *a priori*, una mayor verticalidad que cuando trabaja con objetivos diferentes (pilotes, pozos, sondeos, etc.). Salvo que se corten galerías perimetrales que permitan chequeos a la trayectoria del taladro, la eficiencia mayor se alcanza en péndulos de 30 a 50 m.

8. CONCLUSIONES

Todo lo anteriormente expuesto refleja la imitación continua de la verticalidad con la pérdida de portancia que ha supuesto la incorporación de un sistema de perforación flexible a determinados campos de la ingeniería civil. La totalidad de los datos procede, únicamente, de la experiencia acumulada. No ignoramos que cada obra reúne suficientes peculiaridades como para diferenciarla de su aparente gemela. Ello nos obliga a seguir ampliando y perfeccionando las distintas aplicaciones con el convencimiento pleno de que, por muchas que sean las dificultades, mayores serán las satisfacciones a la hora de lograr atajar un problema que, clásicamente, ha sido de lenta, difícil y costosa solución.

Alfredo Muelas Peña



Nacido en 1946. Licenciado en Ciencias Geológicas en 1970 por la Universidad de Madrid. Diplomado en Hidrología Subterránea en 1971 por la Politécnica de Barcelona. Geología minera en la Compañía de Azufre y Cobre de Tharsis, en Huelva (1971-1973). En 1973 me incorporé a Geotecnia y Cimientos, S. A., realizando trabajos de Geología (11 hojas Magna), Hidrogeología (estudios en varios acuíferos, incluyendo implantación y ejecución de los pozos), reconocimientos en varias cerradas en Galicia, responsable de ejecución en la cimentación de las centrales térmicas de Velilla del Río Carrión (Palencia) y Carboneras (Almería), participante en los diversos estudios realizados para la puesta a punto de la técnica de la rotoperusión en ingeniería civil, coordinador de varios trabajos de geofísica submarina (Algeciras y Tenerife).

Jorge Walliser Bauset

Perito industrial, jefe de Servicio de Geotecnia y Cimientos, S. A. Comienza su actividad profesional en Cimentaciones Especiales (Procedimientos Rodio), en el Departamento de Sondeos e Inyecciones, 1954-1961. Pasa a colaborar en Christensen Diamond Products entre 1964-1966. Se incorpora a Geotecnia y Cimientos, S. A., en 1966. Ha ejecutado numerosas obras: inyección en presas y túneles, sondeos geotécnicos y mineros profundos, cimentaciones especiales mediante pilotes y pantallas continuas.