

VISION DE CONJUNTO SOBRE LOS DIFERENTES SISTEMAS DE VACIADO PARA LA EJECUCION DE PILOTES "IN SITU". ANALISIS DE LOS PROBLEMAS MAS FRECUENTES QUE SUELEN APARECER EN LOS PROCESOS DE PERFORACION

Por JESUS L. PRESA SANTOS

Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos
(Director Técnico de KRONSA-AGROMAN)

ADOLFO ERASO ROMERO

Licenciado en Ciencias Químicas
(Asesor de Dirección de KRONSA-AGROMAN)

1. Preámbulo.

Resulta interesante comprobar que todas las diversas técnicas utilizadas para la ejecución del vaciado de los pilotes "in situ", a pesar de la diversidad de utillaje, maquinaria y patentes empleadas, presentan tres grandes factores comunes, constituidos por:

1. La manera como se lleva a cabo la perforación del terreno.
2. La evacuación de los fragmentos triturados desde el fondo del pozo.
3. El mantenimiento de las paredes del agujero realizado para que la operación de vaciado sea progresiva.

La trituración, propiamente dicha, se lleva a cabo por dos procedimientos fundamentales, a *percusión* y a *rotación*, aprovechando, en el primer caso, la cantidad de movimiento de un trépano al que se deja caer sobre el fondo del pozo, de manera que la energía mecánica liberada en el choque, se utilice en la fracturación del terreno; en el segundo procedimiento, se aprovecha el trabajo de desgarre resultante de la combinación de un esfuerzo de cizalladura y una presión de apoyo realizando la perforación con el empleo de triconos, mesas provistas de rodillos especiales o elementos cortantes de fondo.

La evacuación de los detritus se realiza, también, por dos procedimientos fundamentales, es decir, de manera *discontinua* o en forma *continua*; en el primer caso, por medio de herramientas y cucharas especiales en uno o varios viajes, y en el segundo gracias al arrastre

mediante un fluido adecuado que suele ser generalmente lodo, el cual posee, además, otras propiedades adicionales como ya veremos.

La evitación de derrumbes, y por consiguiente el mantenimiento de las paredes del pozo ya vaciado, se logra gracias al revestido parietal mediante un *entubado* adecuado, hincado, o bien aprovechando las particulares propiedades reológicas del lodo utilizado como fluido de relleno del pozo.

Si consideramos, además, que en el segundo caso al que corresponde evacuación de detritus continua, se utiliza tanto la técnica de *circulación inversa* como el procedimiento de la *circulación directa*, vemos que son posibles 12 casos teóricos, según el siguiente cuadro:

TABLA 1-1.

Número de posibilidades	Perforación	Evacuación de detritus	Mantenimiento pared
1	Percusión.	Discontinua.	Entubado.
2	Rotación.	Discontinua.	Entubado.
3	Percusión.	Circulación inversa.	Entubado.
4	Percusión.	Circulación directa.	Entubado.
5	Rotación.	Circulación inversa.	Entubado.
6	Rotación.	Circulación directa.	Entubado.
7	Percusión.	Discontinua.	Lodo.
8	Rotación.	Discontinua.	Lodo.
9	Percusión.	Circulación inversa.	Lodo.
10	Percusión.	Circulación directa.	Lodo.
11	Rotación.	Circulación inversa.	Lodo.
12	Rotación.	Circulación directa.	Lodo.

de ellos no todos se llevan a la práctica como fácilmente puede deducirse.

La posibilidad número 1, corresponde al procedimiento tradicional del que existen ligeras variantes como veremos.

La posibilidad número 2, justifica el procedimiento moderno de diversas patentes, algunas de ellas recientemente introducidas en España, que también describiremos.

Las posibilidades 3 y 4 no existen, pues carecen de utilidad y casi de sentido.

La posibilidad número 5, es técnicamente posible pero sin embargo no se usa, pues la desborda totalmente la posibilidad número 11.

Las posibilidades 6 y 12 no se utilizan, pues requerirían equipos muy costosos para estos trabajos.

La posibilidad número 7 es perfectamente posible; sin embargo, lleva implícita la dificultad de que las funciones reológicas del lodo que producen la estabilidad vertical de las paredes, lleva acarreado un mayor efecto sifonante a la hora de cucharear para extraer los detritus.

La posibilidad número 8 no solamente existe, sino que se trata de una variante que imprime grandes posibilidades al procedimiento clásico de las perforadoras de gran diámetro con broca helicoidal descrito en la número 2, ya que permite trabajar a mayor diámetro y profundidad.

La posibilidades 9 y 10 no existen, pues son técnicamente difíciles de lograr y casi con certeza que no serían rentables.

La posibilidad número 11, utilizada actualmente en las perforaciones para captación de aguas, presenta tales horizontes, que nos atrevemos a decir que tendrá una gran importancia en las más importantes cimentaciones futuras.

De acuerdo con cuanto antecede, para no sumergirnos en empirismos, nos limitaremos a describir, comparativamente, las posibilidades existentes; es decir, la número 1, la número 2 y su variante número 8, y tras detenernos en algunas consideraciones sobre la número 7, terminaremos con la número 11, en la que pondremos de relieve sus ventajas sobre su variante la número 12.

2. Perforación a percusión con evacuación discontinua y entubado protector.

Este procedimiento al que se refiere la posibilidad número 1 de la tabla 1-1, corresponde al método tradicional de vaciado del pilote.

Los diferentes trépanos utilizados para la fragmentación del terreno, son función de la litología del mismo, siendo los más socorridos los denominados de cruz (ver foto 2-2) y de hacha, ya que sirven desde los terrenos más duros hasta los más blandos.

La evacuación corre a cargo de una variada gama de cucharas, tanto bivalvas como multivalvas, cuya sección es, naturalmente, circular, como cucharas provistas de válvulas del tipo "flapper", de paso en un solo sentido, a veces provistas de émbolo de succión adicional.

En el caso de las cucharas con válvula inferior, debido a que normalmente se suele trabajar bajo el nivel freático en terrenos más o menos sueltos, las succiones violentas al cucharear pueden ocasionar arrastres que desembocan en el sifonado del pilote, frecuentemente se prefieren las cucharas sin émbolo de succión adicional pues son más seguras aunque no rindan tanto.

En el caso de arcillas plásticas donde los trépanos normales se embozan, dan muy buen rendimiento las herramientas mixtas de trépano y cuchara consistentes en un trépano normal de golpeo que lleva adosadas cerca del frente de corte clapetas (trépano Barrenengoa), de manera que al extraer dicho trépano del pozo éstas caen produciendo el acarreo del material arcilloso, ya que su proyección horizontal con las clapetas caídas es también circular.

El mantenimiento de las paredes se consigue mediante la hinca de una tubería de revestimiento cuya zapata va muy próxima al fondo. En algunas ocasiones, en las que la transmisibilidad del terreno es muy alta y el nivel freático se encuentra muy próximo a la superficie del terreno, la zapata de la tubería de revestimiento debe ir, incluso, por debajo del fondo del pozo durante su excavación, ya que de otra manera se produciría el sifonamiento aunque normalmente se compensa, en parte, vertiendo agua dentro del entubado para conseguir un ni-

vel más alto o vertiendo arcilla que se mezcla con el terreno por medio del trépano, lo cual es perjudicial porque anula, en parte, el rozamiento por fuste. Esta circunstancia hace entender fácilmente, que la tubería de revestimiento tenga que ser necesariamente robusta, y por consiguiente pesada, precisándose medios también robustos para su hincada y extracción. Resulta también evidente que el peso total de la tubería de revestimiento supone una limitación a la profundidad total alcanzable en

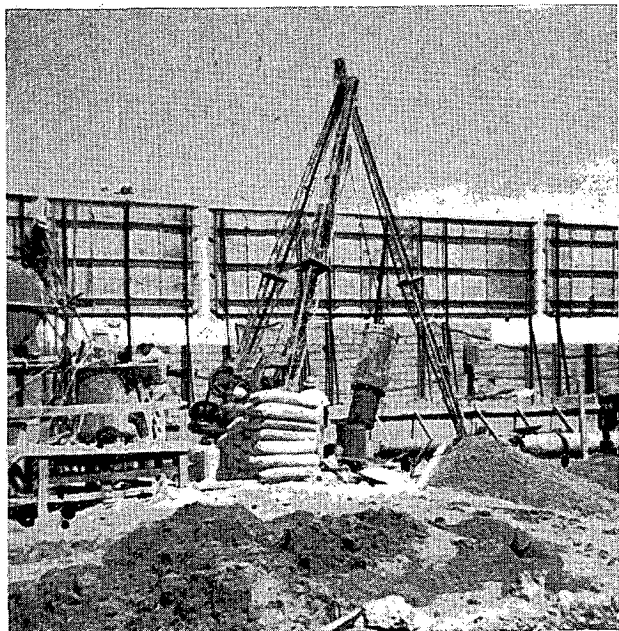


Foto 2-1.

un pilote para un medio de hincada dado, y que varía dentro de ciertos límites de acuerdo con las características intrínsecas del terreno. Esta limitación es también, lógicamente, proporcional a su vez al diámetro a ejecutar. Todo esto lleva acarreado la utilización de diversos procedimientos para su hincada y extracción.

Dichos procedimientos son fundamentalmente tres; el primero y más utilizado para pilotes de menor diámetro, es la hincada por golpeo mediante cucharas especiales (ver foto 2-1), que consisten, fundamentalmente, en un artificio tubular que se carga con peso, el cual actúa sobre la cabeza de la tubería a hincada, a través de un rollizo de madera o sobre una sufridera, de forma que al golpear, produce el descenso deseado en la tubería.

Según como se consigan las tres operaciones de fragmentación de la formación, evacuación de los detritus e hincado del revestido, depende el rendimiento final de la operación que es siempre función de los tipos de terreno, de los medios mecánicos y también, en gran manera, de la habilidad del operario que maneje los equipos.

Para la ejecución de los pilotes de menor diámetro se suelen utilizar cabrias, que son ge-

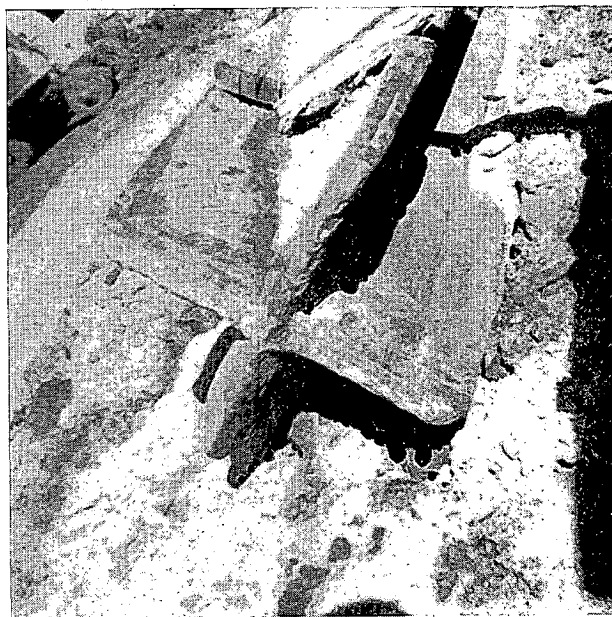


Foto 2-2.

neralmente trípodes, sobre cuyo eje vertical se realizan las maniobras gracias al accionamiento de un cabrestante, que puede ser o no solidario a dos de las patas, y cuya alimentación es, generalmente, eléctrica (foto 2-1).

La extracción de la tubería, una vez finalizado el pilote, se efectúa, en estos casos, mediante la utilización de polipastos.

Los diámetros que se ejecutan con dicho procedimiento, son fundamentalmente de 400 y 600 mm.

El segundo método supone el empleo de entubadoras hidráulicas, mediante las que se consigue la hincada o extracción de los revestimientos, gracias a los grandes momentos tor-

sores que pueden originar el despegue entre el terreno y la tubería.

Estos procedimientos empleados, generalmente, para diámetros mayores de 800 hasta 1 500 mm. Se utilizan con el empleo de grandes máquinas provistas de sistemas de traslación relativamente rápidos, procediendo al vaciado

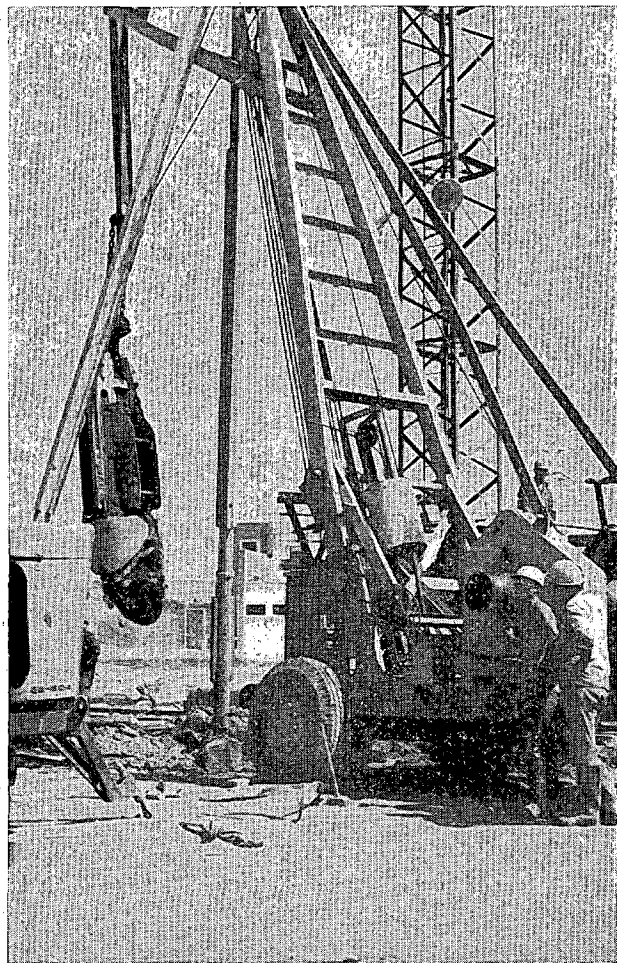


Foto 2-3.

por medio de elementos tales como cucharas, generalmente bivalvas tipo "hammergrab" (foto 2-3), que realizan el vaciado en forma más rápida utilizando elementos de percusión y vaciado por cuchareo, solamente cuando el terreno lo exige.

Cuando se realizan las operaciones de entubado con estos sistemas más antiguos de pilotaje es frecuente precisar esfuerzos de extracción del revestimiento mayores que los necesarios para hinca, los cuales no guardan proporción con el peso real de la tubería de revestimiento.

Las causas por las que se precisan estos esfuerzos son dos, principalmente:

La primera es motivada por un efecto nocivo debido al cuchareo, cuando se emplea este procedimiento, el cual produce un arrastre selectivo de finos sobre todo en terrenos pocos coherentes, que se traduce en un aumento del ángulo de rozamiento interno φ del terreno colindante. Para llegar a conocer mediante valoración relativa lo que esto puede representar, podemos asimilar la hinca de la tubería de revestimiento a la hinca de un pilote prefabricado; el empuje unitario E del terreno sobre la cara exterior de la tubería, podemos suponerla, por ejemplo, según la fórmula de Lehrou-Kerisel de:

$$E = \gamma K h; \quad (2-1)$$

siendo γ la densidad aparente, h la profundidad y K un coeficiente de empuje que vale

$$K = \text{tg} \left[\frac{\pi}{4} + \frac{2}{\varphi} \right] e^{(1,77 + \varphi) \text{tg} \varphi} \cdot \text{sen} \varphi. \quad (2-2)$$

Mediante esta fórmula podemos observar que K es directamente proporcional a φ de una manera exponencial. Por consiguiente, al aumentar φ que resulta del arrastre selectivo de finos por acción del cuchareo aumenta también K , y por consiguiente el empuje horizontal, por lo que será necesario para vencer este rozamiento un esfuerzo adicional que puede ser considerable aun cuando la variación del ángulo φ sea incluso relativamente pequeña.

La segunda causa es debido al efecto de incurvación que frecuentemente se produce al hincar la tubería cuando ésta se compone de virolas roscadas, tanto debida a resistencias heterogéneas del terreno durante la hinca, como a desviaciones propias sobre su eje longitudinal, sobre todo si ésta es empalmable, lo cual suele motivarse por estar las soldaduras y roscas defectuosas.

Afortunadamente, dichas incurvaciones no producen, casi nunca, desplazamientos mayores que el radio del pilote.

Dicha incurvación produce, al tirar de la tubería, un efecto de acodamiento motivado por una componente lateral que es función de la longitud del entubado l y del seno de la mitad ángulo α correspondiente a la desviación (ver figura 2-1).

$$F_h = 2 F \text{sen} \frac{\alpha}{2}. \quad (2-3)$$

De forma que, por ejemplo, un desplazamiento de 30 cm. en su tercio final en un pilote de 600 mm. de 9 m. de longitud, es capaz de producir una componente del 46,6 por 100 del valor de la tensión normal de tiro de la cabria.

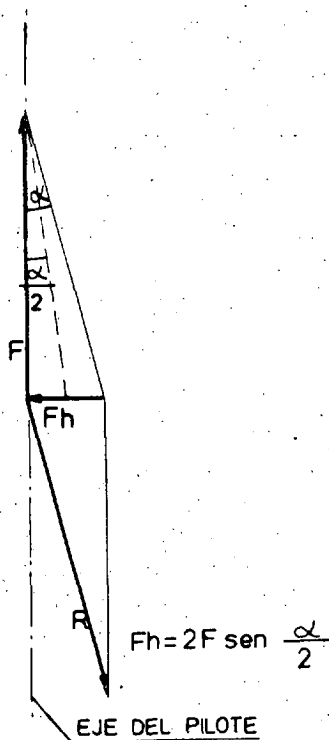


Fig. 2-1. — Efecto de incurvación de la tubería de revestimiento.

En el caso en que la incurvación fuera creciente, la componente creada crecería con la profundidad, según una función dependiente del radio de curvatura, que puede ser muy considerable.

Estas causas son, entre otras, las que suelen producir inconvenientes, tales como roturas y retrasos muy perjudiciales para la marcha y el costo de las obras, siendo además necesario disponer de personal muy experimentado para tratar de que no se produzcan o saber resolverlas.

Un tercer procedimiento de entubación es aquel en el que se emplean vibrohincadores, los cuales tienen gran aplicación sobre todo en terrenos granulares pudiendo llegar a introducir con ellos tubos de hasta 1,50 m. de diámetro y profundidades considerables para pilotaje. En el caso de que se trate de terrenos arcillosos

es necesario combinar la entubación con el vaciado.

Este es el procedimiento más moderno y quizá de mayor porvenir de los procedimientos de entubado para la ejecución de pilotes "in situ" (foto 2-4).



Foto 2-4. — Pilotes entubados por el sistema de vibrohincador.

3. Perforación a rotación con evacuación discontinua, bajo lodo o con entubado protector.

Estos procedimientos, se refieren a las posibilidades número 8 y 2 de nuestra tabla 1-1, que vamos a describir, en conjunto.

Las diferencias fundamentales del equipo de trabajo con relación al tradicional son notorios. En primer lugar, el equipo es automotriz sobre orugas o camión, lo que le introduce gran movilidad incluso en terrenos enfangados. Va dotado de una mesa rotativa susceptible de ser orientada sobre el eje del pilote y perforar hidráulicamente. Foto 3-1 (ver fig. 3-1).

La mesa de rotación, transmite el giro sobre un Kelly telescópico solidario con las herramientas cortantes que luego describiremos, y mediante el ingenioso dispositivo del "hold

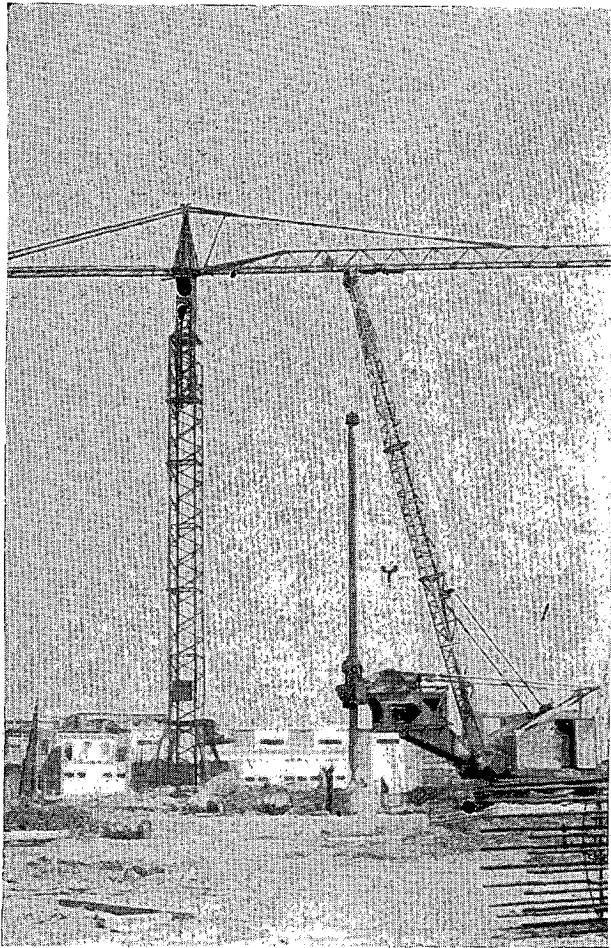


Foto 3-1.

dawn" puede transmitirle, simultáneamente, peso durante determinado recorrido en la perforación que coincide, generalmente, con la capacidad de la cuchara especial que el léxico de origen denomina "bucket".

Este equipo es, particularmente, efectivo en terrenos apropiados, presentando, además, la ventaja sobre los sistemas tradicionales de que la perforación y la evacuación se producen en el mismo viaje, ya que tanto las hélices (fig. 3-2), como las cucharas cilíndricas con cortadores (fig. 3-3), extraen el terreno perforado, que sueltan en superficie por rápido giro, los primeros y mediante la apertura de su fondo abatible las segundas.

En el caso de aparición de obstáculos tales como bolos, obras de fábrica antiguas, etc., al no poderlos extraer mediante dichos útiles, los tiempos de perforación y evacuación se suman en dos operaciones consecutivas, con el consiguiente descenso del rendimiento, ya que es preciso utilizar para el primero trépanos (figura 3-4) evacuándose los detritus formados mediante multivalvas especiales (fig. 3-5), todas ellas adaptables o no al Kelly; es decir, que es necesario trabajar con procedimientos mixtos.

En cuanto al primer procedimiento y debido a que existen limitaciones en la hincada de tubería de revestimiento con estos tipos de má-

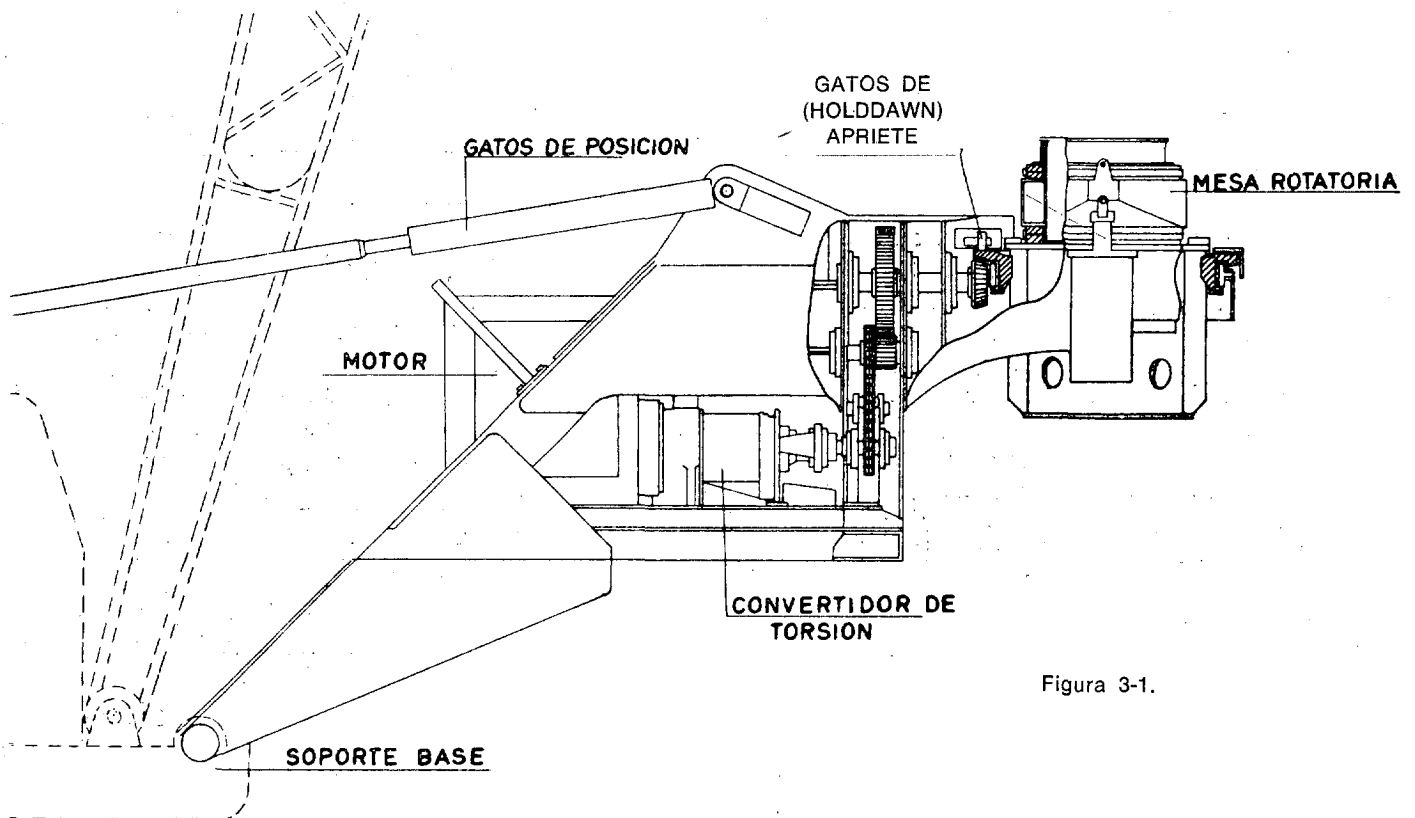


Figura 3-1.

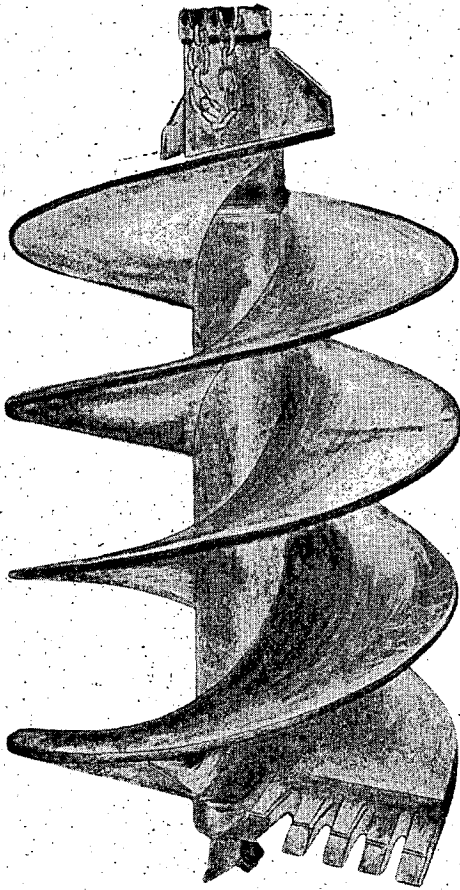


Fig. 3-2. — Hélice de perforación.

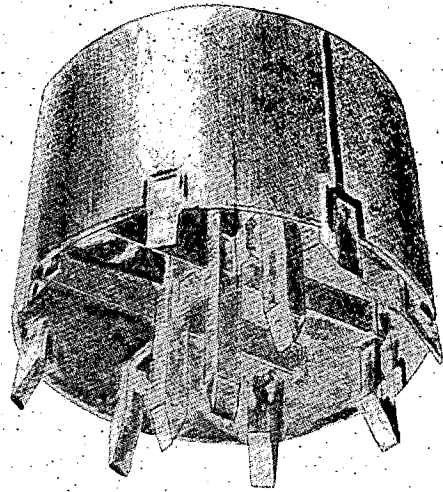


Fig. 3-4. — Trépano especial.

quinas, se recurre a introducirla a rotación, previa perforación del terreno con la cuchara o hélice a las que se han adosado en su parte inferior unos cortadores laterales que sobredimensionan su diámetro original, aprovechando la cualidad que suelen tener los terrenos de mantenerse, aunque sea por poco tiempo, trabajando rápidamente.

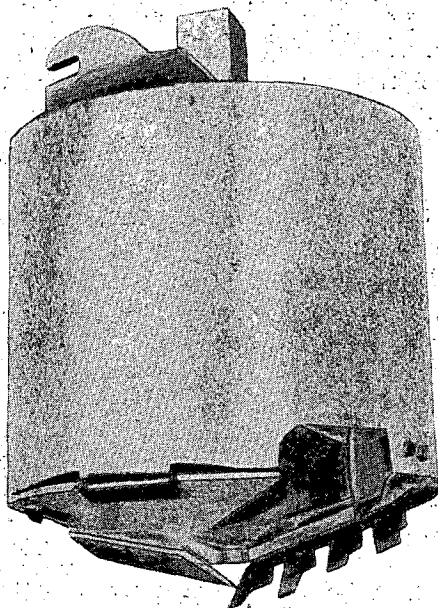


Fig. 3-3. — Cuchara de excavación (Bucket).

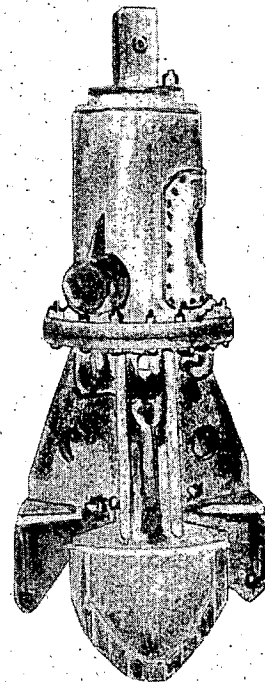


Fig. 3-5. — Multivalva de extracción.

El revestido se reduce, generalmente, a proteger el estrato superior del terreno inestable; por consiguiente, los efectos nocivos expresados en el apartado anterior, debidos al arrastre de finos por cuchareo y la incurvación sufrida por la tubería hincada no existen prácticamente en este caso (fig. 3-6).

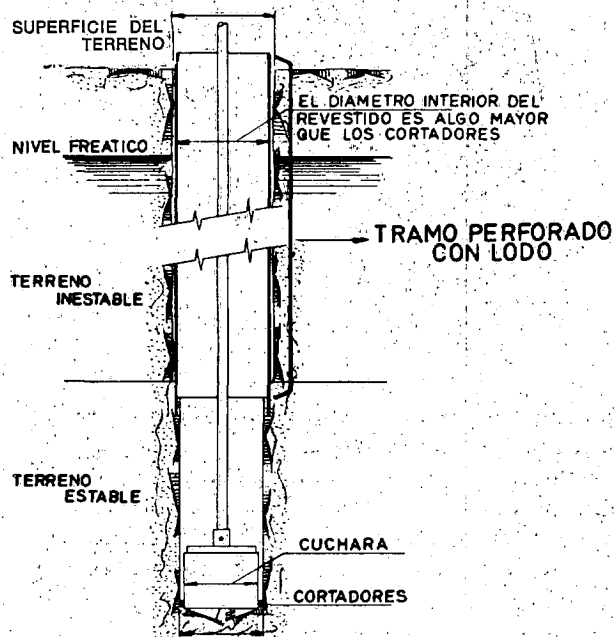


Figura 3-6.

Sin embargo, se produce otro efecto que tiene lugar al excavar el pozo, originado por el estado de tensión creado en su vecindad. Se trata del *efecto de anillo*, mediante el cual, el empuje original del terreno σ_0 antes de excavar se modifica (fig. 3-7); este empuje será:

$$\sigma_0 = K_0 \cdot \gamma \cdot Z;$$

siendo K_0 el coeficiente de empuje al reposo, γ el peso específico del terreno y la profundidad Z , quedando después de realizar la excavación reducido a una tensión normal sobre las paredes del agujero σ_{r0} (a profundidad Z), notablemente menor que σ_0 , que en la vecindad del agujero puede ser mayor que la σ_0 originaria (fig. 3-7).

Terzaghi nos da la forma de las ecuaciones que definen las tensiones radiales σ_r y circun-

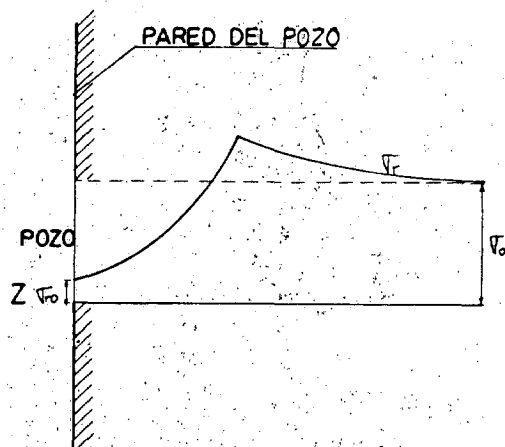


Figura 3-7.

ferenciales σ_v en la vecindad de un agujero (esta última no figura en la 3-7).

$$\sigma_r = \sigma_{r0} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{a-1}; \quad (3-2)$$

$$\sigma_v = a \sigma_{r0} \left(\frac{r}{r_0} \right)^{a-1} \quad (3-3)$$

en las que r_0 es el radio del agujero; r un radio arbitrario de una sección cilíndrica cualquiera, y a viene dado por:

$$a = \operatorname{tg}^2 \left(45^\circ + \frac{\varphi_1}{2} \right); \quad (3-4)$$

siendo φ_1 , la máxima desviación posible de la tensión según el círculo de Mohr en la hipótesis de Terzaghi, en la que φ_1 es siempre menor que el ángulo de rozamiento interno del terreno.

En las ecuaciones (3-2) y (3-3) puede verse que la intensidad de las tensiones σ_r y σ_v decrece radialmente hacia el pozo, de ahí su denominación de efecto de anillo.

En terrenos arcillosos, una vez realizada la perforación e introducido el entubado, el estado de tensiones creado se reajusta en el tiempo al desaparecer gradualmente el efecto de anillo creado, aunque no de una forma total, sí en gran parte; si esto ocurre antes de la extracción del entubado se pueden presentar dificultades que degeneren en la imposibilidad de ejecutar la extracción, debido al cambio de las condiciones iniciales, ya que σ_{r0} tiende en dicho reajuste a adoptar el valor σ_0 notablemente mayor.

Vayamos a un ejemplo:

Supongamos un pilote perforado de 10 metros de profundidad y un metro de diámetro en un terreno de densidad $\gamma = 1,6$ con el nivel freático a cota -5 , densidad sumergida γ' de 1,1 y ángulo de rozamiento interno $\varphi = 30^\circ$.

La σ_{r_0} inicial es a 10 metros de profundidad ($M\sigma = 0,315$, ver Terzaghi).

$$\sigma_{r_0} = M_\sigma \cdot \gamma \cdot r_0 = 0,315 \times 1\,100 \times 1 = 346 \text{ Kg./m.}^2.$$

Mientras que la σ_0 a la misma profundidad, según la ley de empujes ($\lambda_a = 0,334$).

$$\sigma_0 = \lambda_a \cdot \gamma \cdot 5 + \lambda_a \cdot \gamma' \cdot 5 + 1\,000 \times 5;$$

$$\sigma_0 = 0,334 \times 1\,600 \times 5 + 0,334 \times 1\,100 \times 5 + 1\,000 \times 5 = 9\,340 \text{ Kg./m.}^2,$$

de donde se deduce para nuestro ejemplo que al deshacerse en parte el efecto de anillo, la presión ejercida por el terreno en la unidad de área de entubado a 10 metros de profundidad puede llegar a hacerse notablemente mayor, para cuyo vencimiento será necesario el empleo de extractores hidráulicos del tipo ya indicado en el capítulo anterior y tuberías gruesas, lo que normalmente no es utilizado con estos equipos. Para ello se suelen llevar pórticos extractores, los cuales pueden ayudar cuando no se ha restablecido completamente el estado de tensiones primitivo.

El segundo procedimiento empleado para el mantenimiento del taladro consiste en la utilización de lodo, en vez de revestido metálico. Con él no ocurren ninguno de los problemas anteriormente citados para la entubación, toda vez que por tratarse el lodo de un fluido no le pueden afectar en modo alguno reajustes del efecto de anillo, evidenciándose sus ventajas, toda vez que el lodo por sí mismo puede mantener verticales las paredes inestables del terreno. Por ejemplo para el caso tan desfavorable como es la arena suelta sumergida, basta una viscosidad aparente de 15 centipoises para mantener estable indefinidamente las paredes de un pozo perforado con ellas.

El único problema que se presenta es que al acabar de llenar el "bucket", después de concluir uno de los períodos de perforación, el despegue del mismo desde el fondo equivale a levantar además el detritus, toda la columna de lodo del pozo, debido a que éste no ha mo-

jado todavía el fondo del pozo hasta los dientes. El problema se elimina disponiendo de un sistema complementario de corte y maniobrado de forma que la columna del lodo del pozo transmita su presión hidrostática sobre el fondo, pudiendo realizar después la extracción de la herramienta sin inconvenientes.

4. Perforación a percusión con evacuación discontinua bajo lodo.

Esta variante corresponde a la posibilidad número 7 consignada en la tabla 1-1. Se trata, pues, de ejecutar el vaciado del pilote por el procedimiento tradicional, con la sola variante de eliminar el entubado protector, reemplazándolo por lodo, al que se le pide mantenga estables las paredes del hoyo perforado durante su ejecución.

Un buen lodo sencillo y barato nos lo da la dispersión de bentonita (Clarsol FB-2) al 6 por 100 en agua dulce, produciendo los siguientes parámetros reológicos:

Viscosidad aparente μ_a	15 cp.
Viscosidad plástica μ_p	7 cp.
"Yield point" t_y	16 lb./100 ft ² .

siendo capaz de estabilizar paredes en la mayoría de los casos simples.

Sin embargo, el desplazamiento en su seno de la cuchara extractora de detritus puede crear fluctuaciones de presión en el fondo y paredes del pozo capaces de hacer inoperante el sistema.

Es interesante ver con un ejemplo las diferentes fluctuaciones de presión que por efecto de pistón origina el cuchareo en el seno del agua o en el del lodo citado anteriormente.

Rogers nos da las fórmulas de la fluctuación de presión, tanto para líquidos newtonianos como el agua, como para fluidos plásticos tipo Bingham como el lodo:

$$P = \frac{6,72 \cdot 10^{-4} \cdot V \cdot \mu \cdot L}{(D_1 - D_2)^2} \text{ (fluidos newtonianos) (4-1)}$$

$$P = \frac{6,72 \cdot 10^{-4} \cdot V \cdot \mu_p \cdot L}{(D_1 - D_2)^2} + \frac{t_y \cdot L}{225 (D_1 - D_2)} \text{ (fluidos de BINGHAM) (4-2)}$$

fórmulas que sólo se diferencian en un térmi-

no adicional y en las que los diferentes términos son:

P = Fluctuación presión en PSI (libras por pulgada cuadrada).

V = Velocidad lineal del cuchareo (pies por seg.).

μ_p = Viscosidad plástica en centipoises.

L = Longitud de la cuchara en pies.

$D_1 - D_2$ = Tolerancia en el espacio anular en pulgadas.

f_y = "Yield point" en libras por 100 pies cuadrados.

Si suponemos que realizamos un pilote de 600 mm. (23'5"), utilizando una cuchara de cuatro pies de longitud y un diámetro de 570 mm. (22'4"), a una velocidad de ascenso de tres pies por segundo, considerando la viscosidad μ del agua como de un centipoise y los parámetros del lodo dados tenemos:

Para el agua:

$$P = \frac{6,72 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot 1 \cdot 4}{1,2^2} = 0,056 \text{ PSI} = 39,5 \text{ Kg/m}^2$$

y para el lodo:

$$P = \frac{6,72 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot 7 \cdot 4}{1,2^2} + \frac{16 \cdot 4}{225 \cdot 1,2} = 4,612 \text{ PSI} = 3250 \text{ Kg/m}^2$$

es decir, que el lodo produce fluctuaciones de presión de un orden de 82,3 veces mayor que el agua.

Si recordamos, que la clapeta inferior de la cuchara va abierta al decender, pero cerrada al ascender, el efecto creado es siempre de depresión, por lo que el riesgo de sifonamiento se halla exacerbadísimo.

Es evidente que para poner a punto esta técnica se precisaría introducir en ella sustanciosas modificaciones sobre el sistema tradicional para evitar el efecto mencionante de pistón.

5. Perforación a rotación con evacuación continua bajo lodo en circulación inversa.

Este procedimiento se refiere a la posibilidad número 11 de nuestra tabla 1-1, y es actualmente utilizada en la perforación de pozos para captación de aguas subterráneas.

En él, la circulación del lodo entra por el espacio anular del pozo, pasa por la herramienta de corte y sale por el interior del varillaje

mediante el empuje ascensional que se le da por diversos procedimientos (fig. 5-1).

Estos son fundamentalmente tres: extracción por succión (directa) mediante bomba centrífuga, extracción por chorro mediante eyector situado en el Kelly y extracción mediante insuflado de aire en el interior del varillaje.

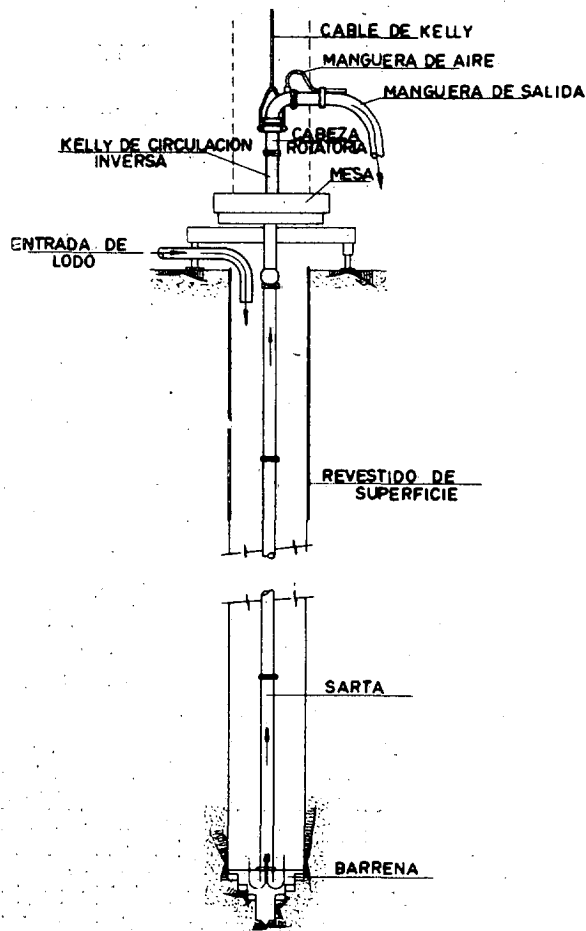


Fig. 5-1. — Esquema de la circulación inversa.

Los dos primeros están siendo desplazados en muchos casos, por este último, siempre y cuando las profundidades superen a los seis metros y el terreno lo permita. Los dos primeros sistemas sólo conseguían empujes de 0,8 y 1,8 Kg./cm.², respectivamente, mientras en el tercero pueden sobrepasar incluso valores de 4 Kg./cm.².

Dentro del sistema de levantamiento por aire existen variantes de uso representadas fundamentalmente por inyección mediante tu-

berías paralelas y exteriores al varillaje, el cual va conectado con bridas o bien con roscas y sobre varillajes concéntricos con insuflado incéntrico o circuncéntrico.

De todos ellos es el último el que parece presentar mayores ventajas por precisarse siem-

tus de tamaño hasta 10 veces mayor que la circulación directa, incluso con una reducción de potencia de hasta cinco veces menor.

La rotación se transmite al varillaje mediante dos procedimientos fundamentales, tanto por la acción de una cabeza rotatoria hidráulica

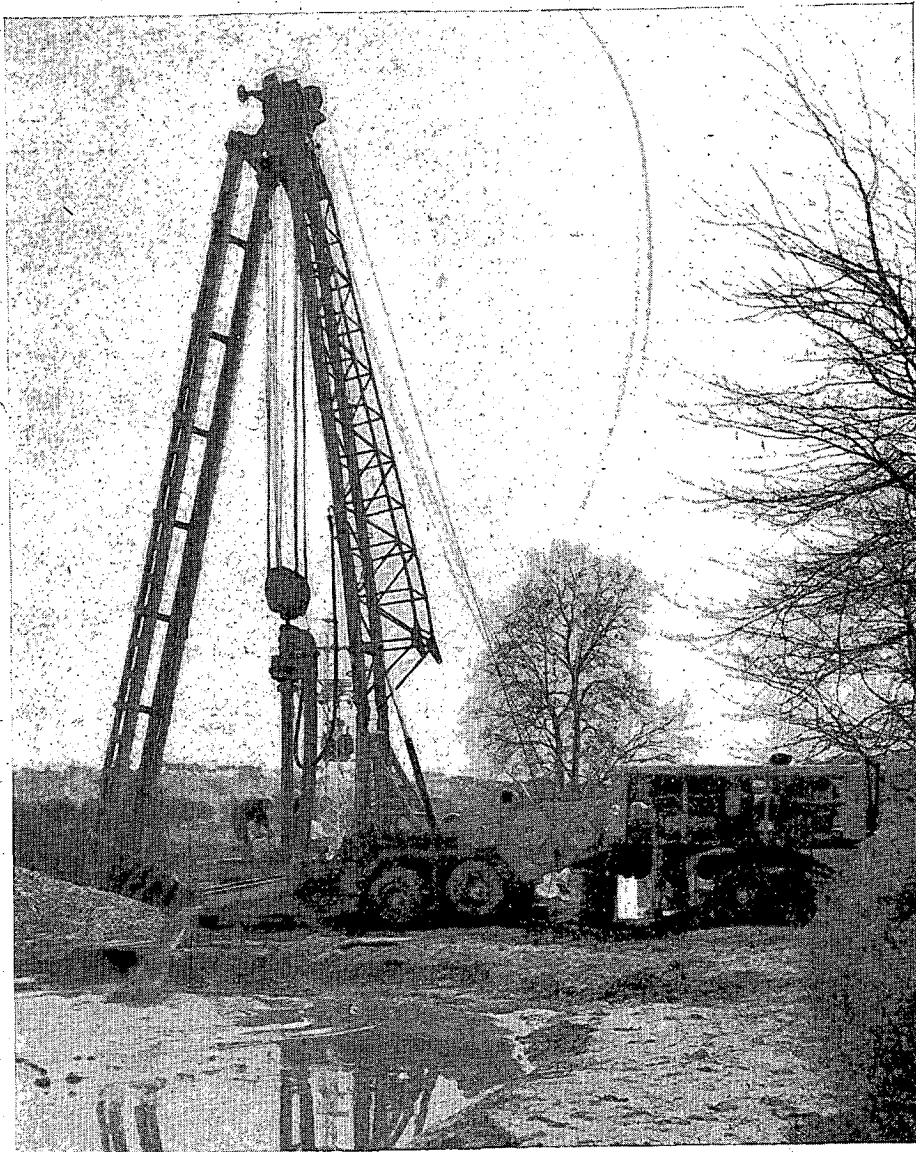


Foto 5-1.

pre que la salida del lodo con el detritus esté lo más expedita posible y el roscado de la tubería no presente las fugas por bamboleo clásicos del varillaje abridado.

Así se consiguen velocidades de extracción de 240 metros por minuto que levanta detri-

susceptible de impartir además peso sobre la sarta como mediante una mesa de rotación que, si bien no transmite peso hacia abajo, puede, por el contrario, dar mayores momentos torsores (ver foto 5-1).

Como aquí la limitación del diámetro a per-

forar no es sino función del volumen de detritus a evacuar por el interior del varillaje, aumentando el diámetro interior de éste se pueden conseguir fácilmente grandes diámetros de pozo, ejemplo: para varillaje de 200 mm., el diámetro óptimo del pozo es el de 1,50 m.

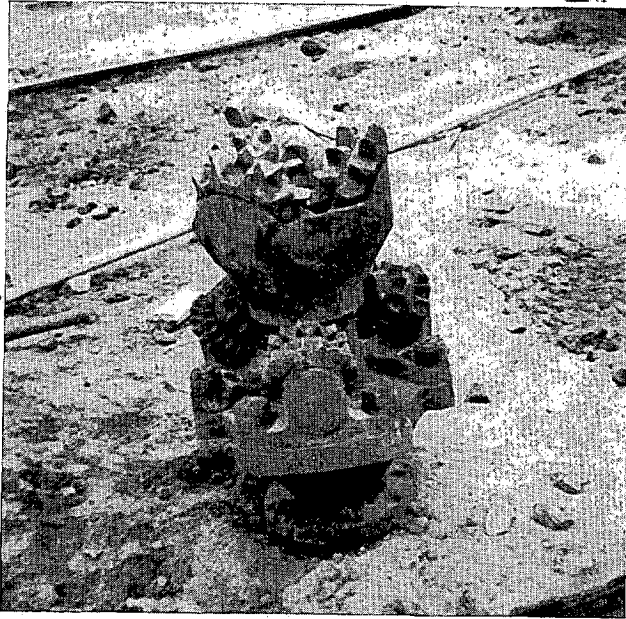


Foto 5-2.

Las herramientas de corte están compuestas fundamentalmente por policonos con rodillos intercambiables (fotos 5-2 y 5-3), cuyo diseño de dientes es función de la dureza de la formación y cuya descripción detallada pasaremos por alto, mencionando solamente que se halla muy matizada en la industria petrolífera. Además se utilizan con buen rendimiento en terrenos blandos, excéntricas como cabezas cortantes tipo Zuplin (ver detalle en la foto 5-1).

Los lodos de bajas viscosidades se comportan mejor que los espesos en la extracción de los detritus, lo que por otra parte no perjudican la estabilidad de las paredes mientras la presión hidrostática de la columna sea mayor que la suma de la propia de los fluidos de la formación y la tensión radial σ_{r0} en la pared del agujero.

La reducción de la presión hidrostática de la columna por circulación es mucho menor que la circulación inversa que en directa al ser

menor su velocidad anular, como se ve por Bernouille:

$$\frac{P}{\gamma} = h - \frac{V^2}{2g} \quad (5-1)$$

donde:

P = Presión.

γ = Densidad del fluido.

V = Velocidad de circulación.

g = Gravedad.

h = Altura de columna de líquido.

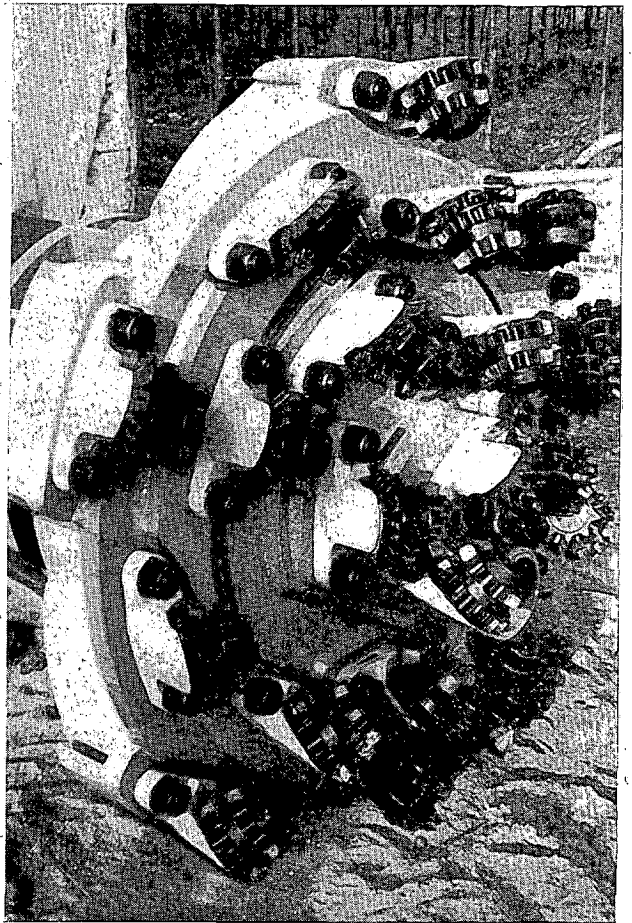


Foto 5-3.

la cual es del orden de 5 por 100 en circulación directa, llegando sólo al 5 por 1 000 en la circulación inversa, por lo que el pozo perforado por este sistema goza por consiguiente de una estabilidad adicional con relación a la perforación con circulación directa.

La diferencia fundamental de este procedimiento de perforación con relación a los otros descritos radica en que sus limitaciones son de índole totalmente diferentes.

En aquellos descritos en los apartados anteriores, la limitación es función de la profundidad; en unos casos por aumento de la superficie de fricción al hincar la tubería, y en otros por la longitud del Kelly, que acciona las cucharas extractoras, que con dificultades se puede llegar a los 50 metros de profundidad.

En el caso que nos ocupa, por el contrario, la extracción de detritus puede realizarse por succión hasta los seis metros, y el resto con aire comprimido, pudiendo llegar a profundidades muy grandes con elevado rendimiento, siempre que el terreno lo permita. A partir de los 30 metros de profundidad, el rendimiento es óptimo, y de esta cota en adelante no existe otra limitación que la impuesta por el peso de la sarta, que en las máquinas diseñadas para perforar diámetros de 600 a 2 000 mm. están comprendidas entre 300 y 400 metros.

Las cimentaciones futuras a grandes profundidades, y sobre todo con grandes diámetros, tienen forzosamente que contar con este procedimiento ejecutivo como un sistema indispensable para su ejecución.

La única limitación radica en las grandes pérdidas de circulación que pueden hacer inoperante el sistema cuando el nivel freático se encuentre muy bajo.

No obstante, dicho riesgo se puede evitar adicionando al lodo aditivos para pérdida de circulación, que producen el sello en fracturas de hasta algunas decenas de milímetros.

La técnica consiste en introducir en la circulación del pozo "plugs" viscosos con contenidos de hasta el 5 por 100 (según la necesidad de las pérdidas) de material colmatante, compuesto de los materiales más diversos desde tierra de diatomeas hasta tiras de celofán pasando por cáscaras de nuez y avellana, con el exclusivo secreto de poseer "granulometrías" o dimensiones específicas bien determinadas.

Como la circulación es motivada por el mayor peso de la columna del fluido en el espacio anular con relación al peso de la del interior del varillaje donde se insufla aire, la relación mínima entre las alturas de elevación y de en-

trada de aire tienen que ser para que haya movimiento:

$$\frac{h}{H} \geq 0,4; \quad (5-2)$$

siendo h la altura de fluido en el espacio anular a partir de la cota de entrada de aire, y H la diferencia de alturas entre la cabeza de perforación y la cota de entrada de aire.

Como los niveles freáticos no son normalmente muy bajos, esto nos da la posibilidad, una vez lograda la submersión necesaria de la ecuación (5-2), de seguir perforando si lo deseamos a base del agua existente en el acuífero, sin necesidad de servicios de superficie, suponiendo que la reserva sea suficiente.

Esto cobra particular interés en el caso de obras marítimas, donde la submersión es siempre suficiente y las condiciones de trabajo ventajosísimas. Debido a estas ventajas son ya varias las obras que se están realizando en el mundo, las cuales han sido resueltas con pilotes generalmente de gran diámetro, pues se han llegado incluso a los 2,50 metros. Estas obras son principalmente muelles de atraque y grandes puentes.

BIBLIOGRAFIA

- Caquot, A.; Kerisel, J.: *Table for the calculation of passive pressure, active pressure and bearing capacity of foundations*. 1 vol., 120 p. Gauthier-Villars, 1948.
- Chellis, R.: *Pile-driving Handbook*. 1 vol., 276 p. Pitman, 1944.
- Jiménez Salas, J. A.: *Mecánica del suelo y sus aplicaciones a la ingeniería*. 1 vol., 393 págs. Dossat. Madrid, 1951.
- Leonards, G. A.: *Les Fondations*. 1 vol., 1106 págs. Dunod. París, 1968.
- Rogers, W. F.: *Composition and Properties of oil well drilling fluids*. 1 vol., 818 págs. Gulf Publishing Comp. Houston, 1963.
- Terzaghi, K.: *Erdbaumechanik*. 1 vol., 397 p. Leipzig, 1925.
- Terzaghi, K., y Peck, R.: *Mecánica de suelos en la ingeniería práctica*. 1 vol., 678 págs. El Ateneo. Buenos Aires, 1963.
- Tschebotarioff, G.: *Mecánica del suelo. Cimientos y estructuras de tierras*. 1 vol., 642 págs. Aguilar. Madrid, 1967.